



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**STUDIUM MAGNETOREOLOGICKÉHO HŘÍDELOVÉHO  
TĚSNĚNÍ**

THE STUDY OF MAGNETORHEOLOGICAL SHAFT SEAL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Dušan Pavlíček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Michal Kubík**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Dušan Pavlíček**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kubík**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Studium magnetoreologického hřídelového těsnění

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dlouhodobým problémem zařízení pracujících s vakuem je hermetického utěsnění rotující hřídele. Magnetoreologické hřídelové těsnění se jeví jako slibný kandidát pro tyto aplikace. Nicméně je nutné experimentálně ověřit použitelnost a provozní parametry tohoto typu hřídelového těsnění.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

### Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentální stanovení provozních parametrů magnetoreologického hřídelového těsnění. V práci bude nutné stanovit vliv otáček a velikosti magnetického pole v aktivní zóně na ztrátový moment a tlakovou únosnost.

Dílčí cíle diplomové práce:

- úprava konstrukce testovacího standu,
- magnetický a konstrukční návrh magnetického obvodu těsnění,
- sestavení metodiky měření ztrátového momentu,
- sestavení metodiky měření tlakové únosnosti.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

KORDONSKI, W. I. a S. R. GORODKIN. Magnetorheological Fluid-Based Seal. Journal of Intelligent Material Systems and Structures [online]. 1996, 7(5), 569-572 [cit. 2016-11-02]. DOI: 10.1177/1045389X9600700518. ISSN 1045-389x.

POTOCZNY, M. a B. ZACHARA. Influence of Magnetorheological Fluid Volume onto Obtained Critical Pressures on Rotary Shaft Seals. Key Engineering Materials [online]. 2011, 490(5), 119-127 [cit. 2016-11-02]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.490.119. ISSN 1662-9795.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

---

Tato diplomová práce se zabývá studiem magnetoreologického těsnění. Cílem práce je stanovení provozních parametrů rotačního magnetoreologického hřídelového těsnění. V práci je stanoven vliv magnetického pole a otáček na tlakovou únosnost a velikost ztrátového momentu těsnění. Provozní parametry byly měřeny na zkonstruovaném experimentálním zařízení. Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že magnetoreologické těsnění se vyznačuje velkou tlakovou únosností. Jeho nevýhody jsou velký brzdný ztrátový moment a prosakování nosného oleje z magnetoreologické kapaliny. Tyto problémy byly vyřešeny novou konstrukcí magnetického obvodu, která byla identifikována jako magnetoreologické gradientní svěrné těsnění (MRGPS).

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

---

MR kapalina, magnetické těsnění, magnetoreologické těsnění, magnetoreologické gradientní svěrné těsnění, MRGPS.

## **ABSTRACT**

---

This thesis deals with the experimental study of magnetorheological shaft seal. The purpose of this diploma thesis is to describe the operating parameters of rotational magnetoreological shaft seal. In thesis, the effects of magnetic field and shaft speed on the pressure resistance and braking torque are described. Operating parameters were measured by an experimental device. Research has shown that the magnetoreological seal is characterized by a high pressure resistant. Disadvantages are the high braking torque and leakage of carrier oil from the magnetorheological fluid. These problems have been solved by a new design of magnetic circuit, that has been identified as a magnetoreological gradient pinch seal (MRGPS).

## **KEY WORDS**

---

MR fluids, magnetic seal, magnetorheology seal, magnetorheological gradient pinch seal, MRGPS.

---



---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLÍČEK, D. *Studium magnetoreologického hřídelového těsnění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Kubík.

---





---

## PODĚKOVÁNÍ

---

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Kubíkovi za jeho odborné vedení, rady a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu studia a poskytovali mi dobré studijní zázemí.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Studium magnetoreologického hřidelového těsnění vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Kubíka a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně 19. května 2017

.....  
podpis autora

---



**OBSAH**

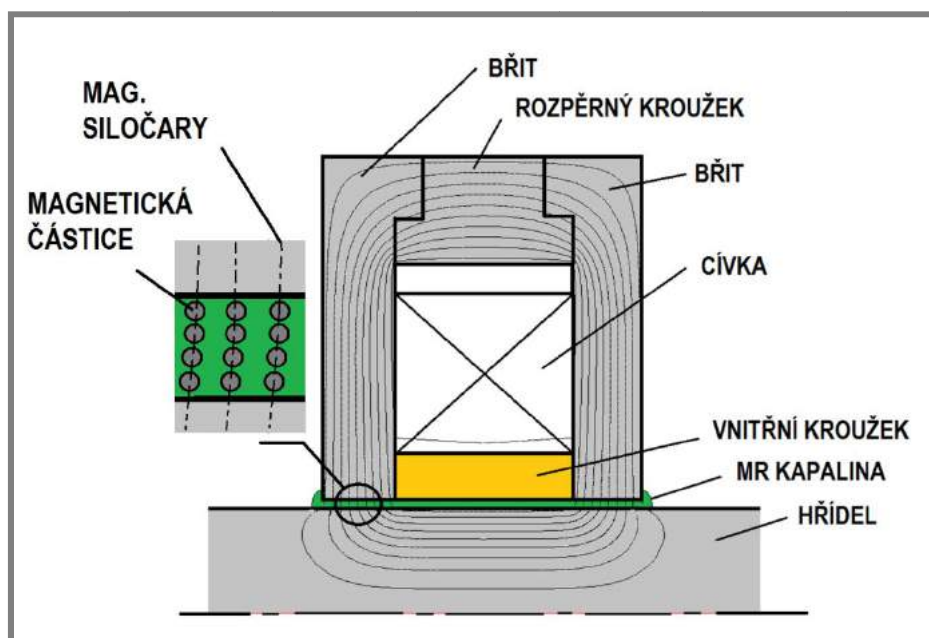
---

<b>OBSAH</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1 Magnetické kapaliny	14
2.1.1 Technické použití MR kapalin	14
2.1.2 Ventilový mód (MR tlumič)	15
2.1.7 Micro - nano magnetoreologická kapalina pro magnetické těsnění	18
2.2 Magnetické těsnění	19
2.2.1 Princip magnetického těsnění	19
2.2.2 Výpočet tlakové únosnosti	20
2.2.7 Magnetické těsnění s MR kapalinou	28
2.3 Zhodnocení poznatků na základě kritické rešerše	32
<b>3 CÍL PRÁCE, VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA</b>	<b>33</b>
3.1 Cíl práce	33
3.2 Vědecká otázka	33
3.3 Pracovní hypotéza	33
3.4 Odůvodnění nutnosti a potřeby řešení	33
<b>4 MATERIÁL A METODY</b>	<b>34</b>
4.1 Experimentální zařízení	34
4.3 Magnetoreologické těsnění	38
4.3.1 Varianta 1	38
4.3.2 Varianta 2	40
4.3.3 Varianta 3	42
4.5 Metodika testování ztrátového momentu	48
4.5.1 Kalibrace a nastavení snímačů	52
4.6 Metodika testování tlakové únosnosti těsnění při různých otáčkách	52
<b>5 VÝSLEDKY</b>	<b>54</b>
5.1 Měření magnetické indukce	54
5.2 Průběh magnetické indukce ve šterbině těsnění	56
5.3 Ztrátový moment magnetického těsnění	57
5.3.1 Ztrátový moment varianty 3	60
5.4 Statická tlaková únosnost těsnění	62
5.4.1 Tlaková únosnost optimalizované varianty 3	66
5.5 Dynamická tlaková únosnost	66
<b>6 DISKUZE</b>	<b>69</b>
6.1 Vliv magnetického pole	71
6.2 Vliv otáček	71
6.3 Výstupy práce	71
6.4 Návrh možných budoucích konstrukčních úprav experimentálního zařízení a metodiky testování	72
6.4.1 Magnetické těsnění a MR kapalina	72
6.4.2 Experimentální zařízení	73
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>74</b>
<b>8 BIBLIOGRAFIE</b>	<b>75</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>77</b>
9.1 Seznam použitých zkratk	77

9.2 Seznam použitých symbolů a veličin	77
<b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>79</b>
<b>11 SEZNAM TABULEK</b>	<b>82</b>
<b>12 SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>83</b>
Příloha 1:	83
Příloha 2:	83
příloha 3:	83
<b>PŘÍLOHA 1:</b>	<b>84</b>

## 1 ÚVOD

Magnetoreologické kapaliny byly poprvé představeny Rabinowem v roce 1948. Tyto kapaliny spadají do kategorie tzv. chytrých materiálů, někdy označovaných jako *Smart materiály*. Magnetické kapaliny jsou suspenze jemných feromagnetických částic v nosné kapalině. Tyto kapaliny se vyznačují tím, že mají schopnost měnit své reologické vlastnosti v závislosti na velikosti vnějšího magnetického pole. Tato změna je velice rychlá, pohybuje se do 1ms. S použitím magnetických kapalin byly realizovány nové technologie, které jsou v mnohém ohledu výhodnou alternativou k dosavadním, jako je například magnetické těsnění. Princip magnetického těsnění je založen na interakci magnetické kapaliny s magnetickým polem. Magnetické těsnění je složeno ze dvou břitů, hřídele, zdroje magnetického pole, přičemž prostor mezi břity a hřídelí je vyplněn magnetickou kapalinou, která je zde udržována prostřednictvím magnetického pole [1]Obr. 1.



Obr. 1 Princip magnetického těsnění

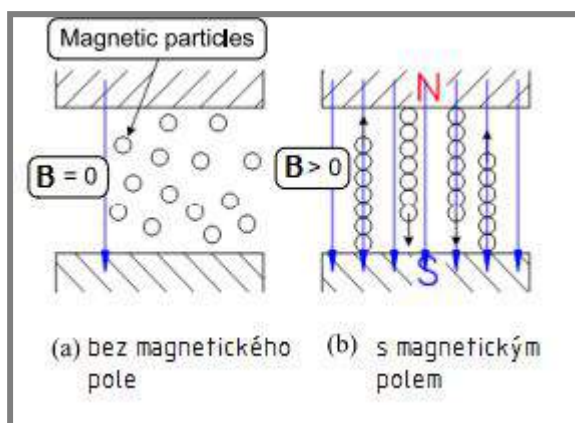
V současné době jsou velmi rozšířené těsnění, které využívají jako těsnící médium ferrokapalinu. Tyto těsnění jsou charakterizovány velmi malými hodnotami ztrátového brzdného momentu a perfektní schopností hermeticky oddělit dvě těsněná média. Hlavní nevýhodou těsnění s ferrokapalinou je relativně nízká tlaková únosnost a vysoká pořizovací cena.

Podobné těsnění s magnetoreologickou kapalinou zvládá utěsnit mnohem větší přetlak. Magnetoreologické těsnění se proto jeví jako progresivní způsob utěsnění, jak rotačního, tak posuvného pohybu pro celou řadu zařízení, kde je požadavek hermetičnosti nebo zdravotní nezávadnosti (chemické reaktory, mikroskopy atd.).

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Magnetické kapaliny

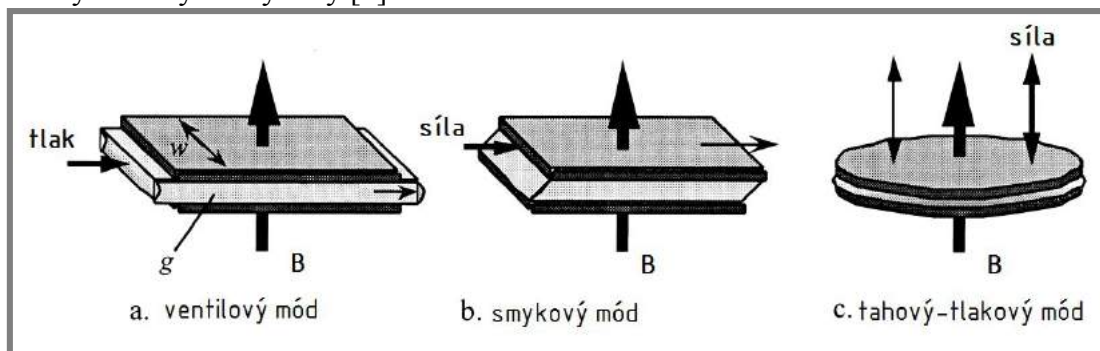
Kapaliny, u kterých se významně projevuje interakce mezi kapalinou a magnetickým polem, se nazývají magnetické kapaliny. Ty dále dělíme podle velikosti jejich magnetických částic na Ferrokapaliny a Magnetoreologické kapaliny (MR kapaliny). Magnetické kapaliny jsou suspenze jemných feromagnetických částic v nosné kapalině. Tyto částice mají přibližně kulový tvar. U Ferrokapalin mají průměr řádově v jednotkách až desítkách nanometrů a u MR kapalin jsou částice o průměru v jednotkách mikrometrů. Mikročástice v MR kapalině jsou multidoménové na rozdíl od jednodoménoových nanočástic. To má výrazný vliv na jejich magnetoreologické schopnosti. Pokud nejsou MR kapaliny magneticky polarizovány, nemají magnetický moment. MR kapaliny v porovnání s Ferrokapaliny obsahují podstatně větší podíl pevných látek až 70 % (hmotnostních). Od Ferrokapalin se MR kapaliny liší převážně tím, že vykazují velmi silný magnetoviskózní jev. Částice v MR kapalině se při interakci s magnetickým polem začnou řetězit a tím dojde ke zvýšení její zdánlivé viskozity. Tento jev se nazývá MR efekt[1, 2].



Obr. 2 MR efekt [2].

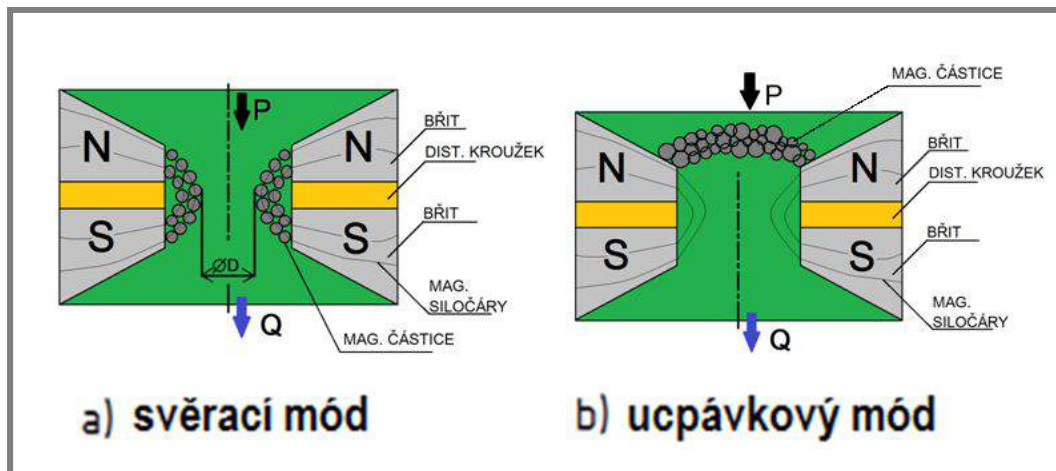
#### 2.1.1 Technické použití MR kapalin

V MR zařízeních pracuje MR kapalina v tzv. „módech“. Je to tedy konkrétní způsob zatěžování MR kapaliny. Mezi základní zatěžovací módy řadíme ventilový, tahový-tlakový a smykový [3]Obr. 3



Obr. 3 Zatěžovací módy MR kapaliny[3].

MR kapalina může také pracovat v alternativních zatěžovacích módech, jako jsou svěrací mód a ucpávkový mód [4]. Obr. 4

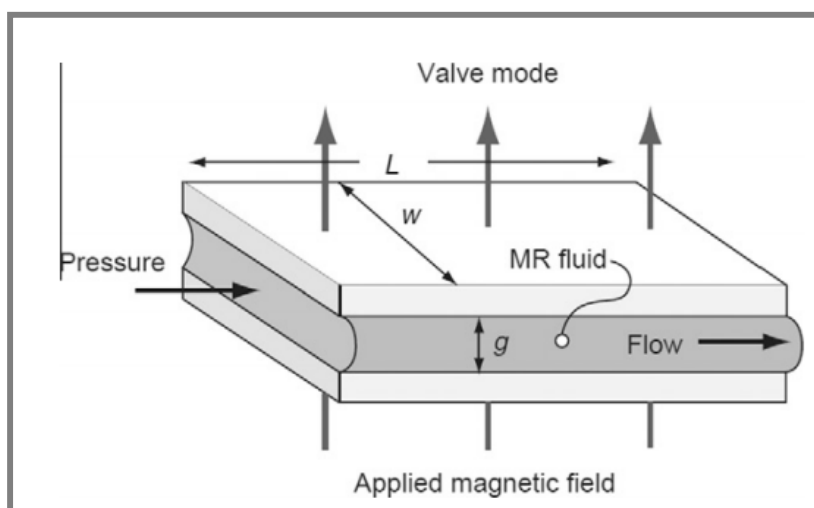


Obr. 4 Alternativní zatěžovací módy MR kapaliny (upraveno) [4]

### 2.1.2 Ventilový mód (MR tlumič)

2.1.2

Při ventilovém módu MR kapalina proudí mezi dvěma deskami. Pokud však deskami začne procházet magnetické pole, feromagnetické částice kapaliny se začnou řetězit (MR efekt). U MR kapaliny poté dojde k výraznému zvýšení meze toku. Pokud budeme zvyšovat tlak na MR kapalinu na kritickou hodnotu. Dojde k porušení meze toku v místě styku MR kapaliny a desek. Zbytek MR kapaliny projde mezi deskami jako celek Obr. 5. To má za následek zvýšení zdánlivé viskozity MR kapaliny. Toho se v mnoha aplikacích využívá. Typickým zástupcem ventilového módu jsou MR tlumiče, kde cíleným zvyšováním zdánlivé viskozity se zvyšuje tlumící síla magnetoreologického tlumiče. [5, 6]



Obr. 5 Ukázka ventilového módu [6]

### 2.1.3 Smykový mód

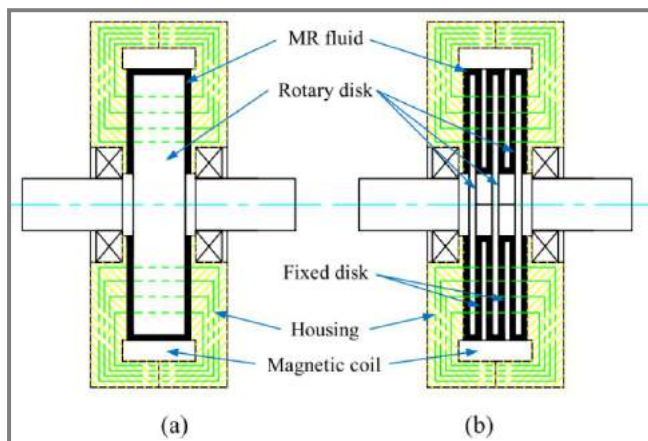
Podobně jako u ventilového módu se MR kapalina nachází mezi dvěma deskami. Způsob zatěžování MR kapaliny se ovšem realizuje smýkáním desek vůči sobě. Příkladem smykového módu je magnetoreologická brzda. Obr. 6 Pokud se desky vůči sobě pohybují konstantní rychlostí, pak potřebná síla pro pohyb desky je dána součtem [5,16].

$$F_{MR} = F_{mag} + F_{\mu} \quad (1)$$

$$F_{mag} = \pi y^2 \tau_y(I) \quad (2)$$

$$F_{\mu} = \pi y^2 \frac{\mu v_0}{g} \quad (3)$$

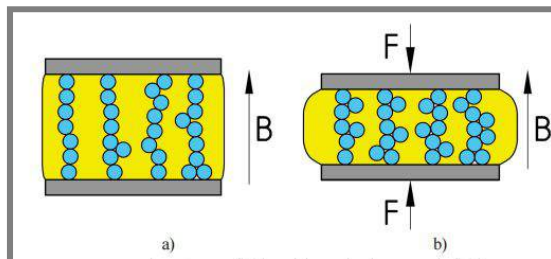
Kde  $\eta$  je dynamická viskozita,  $y$  je přetvoření,  $\tau_y(I)$  je smykové napětí MR kapaliny,  $v_0$  je rychlost pohybující se desky a  $g$  je vzdálenost mezi deskami [7].



Obr. 6 MR brzda a) jednolamelová, b) vícelamelová [2]

### 2.1.4 Tlakový – tahový mód

Jedna deska a kapalina jsou v klidu a druhá deska se pohybuje s malou amplitudou. MR kapalina vyplňuje prostor mezi deskami. Tahově – tlakový mód se používá pro řízení malých, milimetrových posuvů za působení velkých sil. Má také výborné tlumící vlastnosti při tlumení vibrací a rázů (stejně jako silentbloky). Tento konkrétní mód je nejméně využíván a byl zatím nejméně prozkoumán [8].



Obr. 7 Ukázka tahového-tlakového módu a) bez zatížení, b) se zatížením [8]

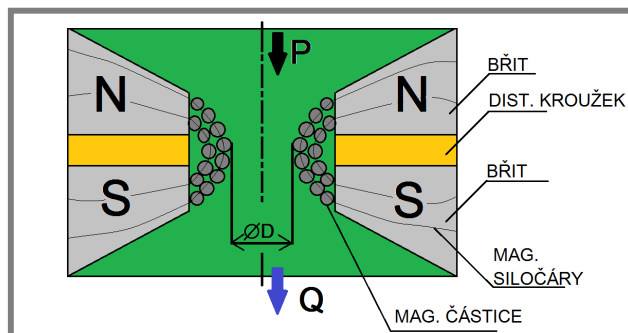


### 2.1.5 Svěrací mód

Autoři Goncalves a Carlson se rozhodli najít způsob, jak umožnit využití levnějších MR kapalin o velikosti částic až 100 µm. Standardní železný prášek, který se používá dnes je poměrně drahý a cílem bylo navrhnout ventil, který by umožnil využití větších a hrubších částic, které jsou podstatně levnější než současné. MR kapaliny s takto velkými částicemi se při použití ve standardních MR ventilech s malou propustnou mezerou ucpávají. Výsledkem jejich práce byl MGP ventil Obr. 8. Běžné MR kapalinové ventily spoléhají na schopnost generovat magnetické pole a vytvářet tak mez kluzu v celém aktivním objemu kapaliny. Kapalina se v podstatě stává pevnou a žádný tok nenastane, dokud se tlak nestane dostatečně velký, čímž tekutina v blízkosti stěn povolí a vnitřní část projde jako pevné těleso. Čím větší je magnetické pole, tím větší je mez kluzu a roste tlak požadovaný pro pohyb MR kapaliny. Zásadní rozdíl mezi běžným MR kapalinovým ventilem a ventilem pracujícím ve svěracím módu je v návrhu magnetického obvodu. Obr. 8 Uspořádání pólů v axiálním směru podél dráhy proudění a oddělení pólů nemagnetickou distanční vložkou vytváří vysoce nestejněmagnetické pole. Spíše než tuhnutí kapaliny v celém ventilu, tuhne MR kapalina pouze v blízkosti stěny. Celková síla magnetického pole bude ovládat vzdálenost, ve které kapalina ztuhne, a tak účinně kontrolovat průměr otvoru. Tento typ regulace byl identifikován jako Svěrací mód. Autoři také odvodili vztah pro výpočet proudění [4].

$$p = \frac{50,4\eta Q}{\pi D^3(H)} \quad (4)$$

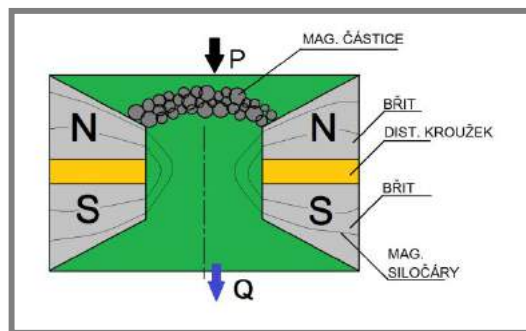
Kde  $p$  je tlak,  $\eta$  je dynamická viskozita,  $Q$  je průtok,  $D$  je průměr,  $H$  je intenzita magnetického pole [4]



Obr. 8 Svěrací mód (upraveno)[4]

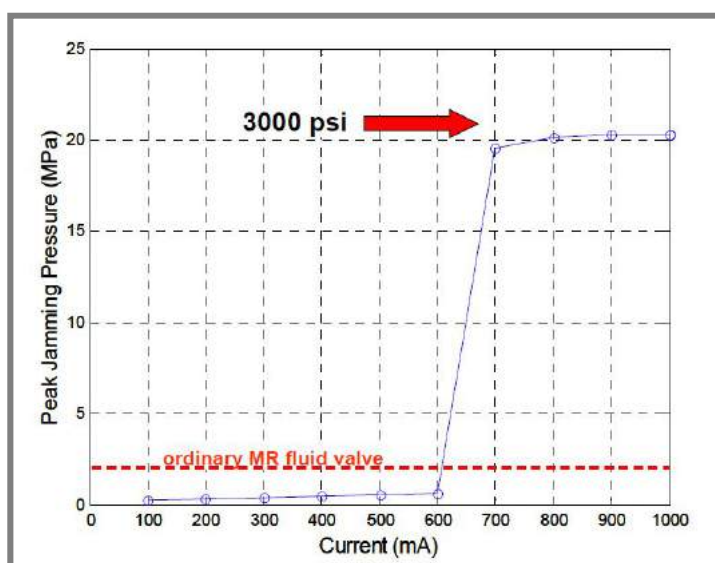
### 2.1.6 Ucpávkový mód

Při testování MR kapalin s velkými částicemi autoři Goncalves a Carlson pozorovali, že dostatečně silné magnetické pole by mohlo iniciovat kontrolovatelné a opakovatelné, ucpávání ve ventilu. Tento typ řízeného ucpávání štěrbin byl identifikován jako ucpávkový mód.



Obr. 9 Ucpávkový mód (upraveno) [4]

Při testování tohoto módu, při kruhové mezeře o velikosti průměru 2 mm a s MR kapalinou o velikosti částic v rozmezí (45 až 150)  $\mu\text{m}$ , autoři dosáhli tlakových špiček až 200 bar [4].



Obr. 10 Tlaková únosnost ventilu MGP [4]

Aplikace těchto alternativních módů v magnetoreologickém těsnění, by mohla eliminovat nevýhody jako jsou například velký ztrátový moment a silná závislost tlakové únosnosti na velikosti otáček.

### 2.1.7 Micro - nano magnetoreologická kapalina pro magnetické těsnění

MR těsnění vyžaduje speciální požadavky kladené zejména na MR kapalinu. Autoři vynalezli magnetickou kapalinu, která má hodnotu magnetické saturace vyšší než ferrokapalina a nedochází u ní k průsaku nosného oleje z magnetoreologické kapaliny. Tohoto efektu bylo dosaženo přidáním nanočástic do MR kapaliny. Tyto nanočástice poté ucpávají mikro mezery mezi řetězci mikročástic. Kapalina je tedy složena z nosného oleje, směsi nano a mikročástic a obsahuje také aditiva. Tato kapalina obsahuje hmotnostně 47 až 89,5 % směsi feromagnetických částic. Klíčové pro správnou funkci této MR kapaliny je hmotnostní poměr mikro a nano částic. Jejichž poměr autoři doporučují v rozmezí mikro částice : nanočástice = 0,2 : 1 až 4,5: 1. Kromě tohoto poměru musí magnetické částice také mít přibližně kulový tvar a velikost mikročástic musí být v rozmezí od 2 do 20  $\mu\text{m}$ . Nanočástice musí mít velikost od 1nm do 15nm. Hmotnostní procento přísad je 0,5 až 3 %, přičemž

hmotnostní procento základního nosného oleje je 10 až 50 %. Jako aditivum byla použita kyselina olejová. Základní nosná kapalina může být deionizovaná voda, silikonové oleje, minerální oleje, uhlovodíkové oleje nebo glycerol. Autoři patentu se zmiňují o velké tlakové únosnosti této kapaliny, bohužel nehovoří o tom jak, si tato kapalina vede se ztrátovým momentem [9].

Autoři také popisují výrobní postup testované magnetické kapaliny. 400 ml deionizované vody se smíchá s 18 g mikročástic. Tato suspenze se začne míchat a zahřívá dokud nedosáhne teploty 80 °C. Poté se přidá 12 ml kyseliny olejové, následuje míchání při teplotě 80 °C po dobu 3 hodin. Poté se suspenze několikrát propláchne deionizovanou vodou, dokud nebude mít neutrální hodnotu pH. Poté se suspenze vysuší a smíchá s 15 g minerálního oleje. Následuje míchání po dobu 2 hodin. Nakonec se směs míchá v kuličkovém mlýnu po dobu 5 hodin [9].

## 2.2 Magnetické těsnění

---

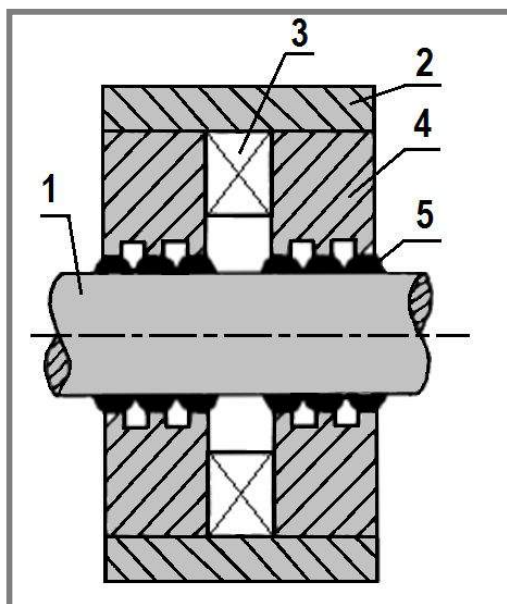
2.2

### 2.2.1 Princip magnetického těsnění

---

2.2.1

Princip jejich činnosti je založen na interakci magnetické kapaliny s magnetickým polem. Standardní provedení magnetického těsnění je znázorněno na Obr. 11. Ve volném prostoru mezi tělesem těsnění a hřídelí je magnetická kapalina (5), která se zde udržuje pod vlivem magnetických sil a zajišťuje utěsnění vnitřního média. Struktura magnetického těsnění je ukázána na Obr. 11. Magnetické těsnění je složeno ze zdroje magnetického pole (permanentní magnety, cívka) (3), břitů těsnění (4), hřídele (1) a magnetické kapaliny (5). V případě magnetického těsnění se zdrojem magnetického pole tvořeném cívkou je ještě zapotřebí uzavírat magnetický obvod pomocí vnější trubky z feromagnetického materiálu (2) [10–12].



**Obr. 11** Schéma magnetického těsnění 1) hřídel, 2) vnější trubka, 3) zdroj mag. pole, 4) břity těsnění, 5) mag. kapalina (upraveno) [11]

---

### 2.2.2 Výpočet tlakové únosnosti

Při návrhu magnetického těsnění se v praxi velmi osvědčily břity, které mají zubový tvar. Veškeré výpočty byly odvozeny pro těsnění s permanentními magnety a těsnícím médiem Ferrokapalinou. Pro přibližný výpočet tlakové únosnosti magnetického těsnění se uvádí tento vzorec [10, 11]:

$$\Delta P = N_i M_s (B_{max} - B_{min}) \quad (5)$$

kde  $\Delta P$  je tlaková únosnost,  $M_s$  je hodnota magnetické saturace kapaliny,  $N_i$  je počet zubů těsnění a  $B$  je hodnota magnetické indukce vypočtená pomocí MKP výpočtu statického rozložení magnetického pole. Tento výpočet je platný pro nerotační hřídel (ventilový mód) nebo pro nízké otáčky do  $200 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , pro těsnění s Ferrokapalinou. Pro návrh těsnění s rotační hřídelí platí vztah [10, 11]:

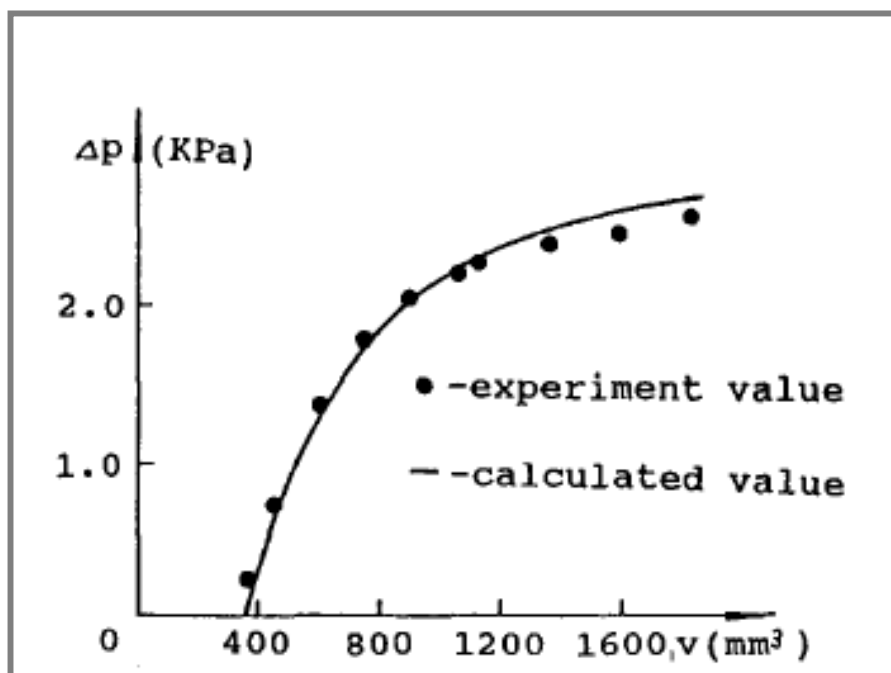
$$\Delta P = N_i [M_s (B_{max} - B_{min}) + \varphi_{(r2)} - \varphi_{(r1)}] \quad (6)$$

$$\varphi_{(r)} = \frac{1}{2} \rho (C_1^2 r^2 - \frac{C_2^2}{r^2} + 4C_1 C_2 \ln r) \quad (7)$$

$$C_1 = -\frac{R_1^2 \omega}{R_2^2 - R_1^2} \quad (8)$$

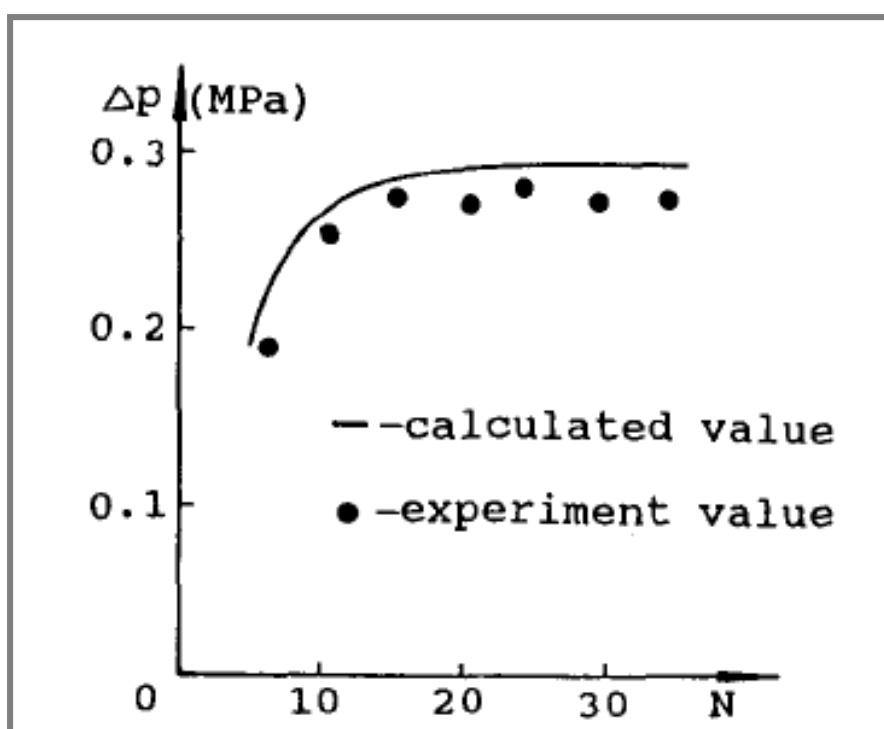
$$C_2 = -\frac{R_1^2 R_2^2 \omega}{R_2^2 - R_1^2} \quad (9)$$

Kde  $R_1$  je průměr hřídele,  $R_2$  je vnitřní průměr břitu těsnění,  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení hřídele,  $\rho$  je hustota magnetické kapaliny,  $r$  je střední průměr štěrbiny těsnění. Na únosnost těsnění má výrazný vliv i množství magnetické kapaliny, která se nachází mezi břitem a hřídelí, ale také na bocích břitů těsnění. Zvýšením objemu magnetické kapaliny se zvětšuje oblast výskytu magnetické kapaliny na boku břitu Obr. 15. Na Obr. 12 lze vidět závislost množství magnetické kapaliny na tlakovou únosnost těsnění [10, 11].



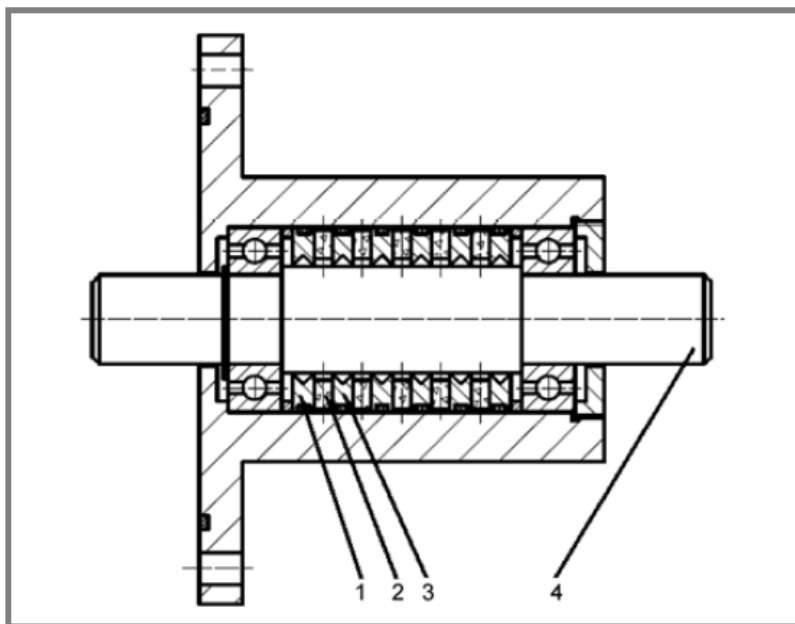
Obr. 12 Závislost množství mag. kapaliny na tlakovou únosnost [11]

Tlaková únosnost těsnění se také dá zvýšit vyšším počtem břitů.



Obr. 13 Závislost počtu břitů na tlakovou únosnost těsnění [11]

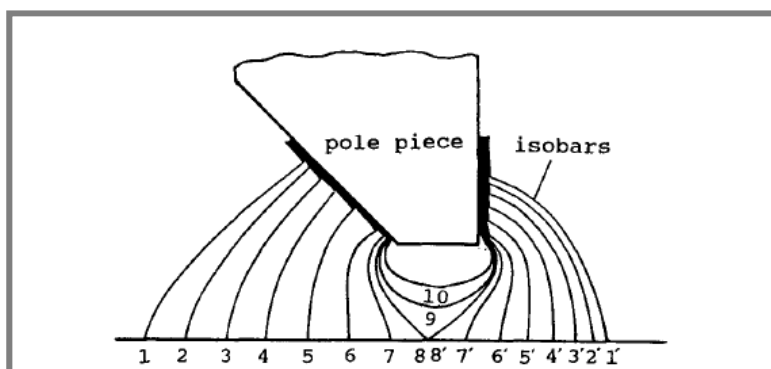
Experimentální uspořádání více břitů s více zdroji magnetického pole.



Obr. 14 Uspořádání více břitů a více zdrojů mag. pole [10]

### 2.2.3 Výpočet proudění v mezeře magnetického těsnění

Výpočet se provádí po fázi výpočtu rozložení magnetického pole. Při výpočtu rozložení statického magnetického pole je také nutné pro výpočet stanovit hranice výskytu magnetické kapaliny. Hranice výskytu magnetické kapaliny odpovídá tvaru isobarám. Tvar isobary se zjistí ze statického výpočtu rozložení magnetického pole. Průběh isobary je pak shodný s průběhem magnetických siločar. Obr. 15 [11, 13, 14].

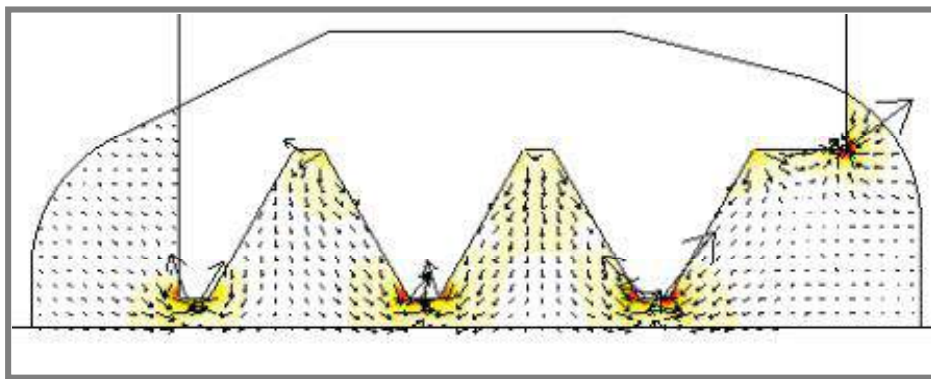


Obr. 15 Hranice výskytu magnetické kapaliny [11]

Po stanovení hranic magnetické kapaliny se vypočte síla, která působí na jednotku objemu kapaliny [13, 14].

$$\vec{F}_m = \mu_0 M_s \nabla H \quad (10)$$

Kde vektor  $F_m$  je objemová síla,  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $H$  je intenzita magnetického pole [13, 14].

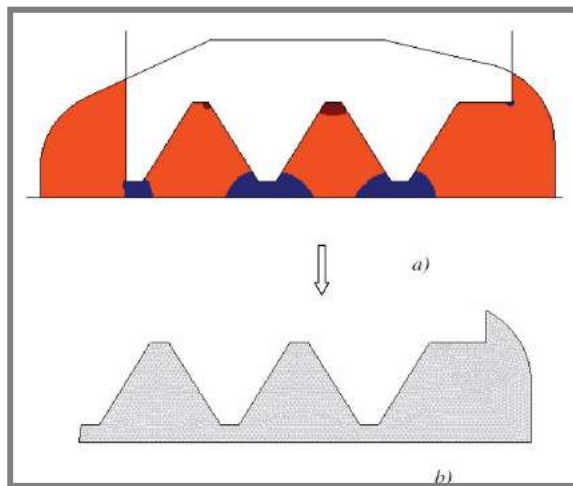


Obr. 16 MKP výpočet objemových sil v magnetické kapalině [14]

Při řešení hydrodynamického problému byly použity tyto okrajové podmínky:

1. V případě otáčení hřídele je okrajová poloha magnetické kapaliny shodná s vnějším povrchem hřídele a vnitřním povrchem bříty. Poloha rozhraní tekutiny je znázorněna na Obr. 15 a je dále považována za hranice výpočetní oblasti hydrodynamického problému [13, 14].

2. Rozložení magnetického pole v mezeře magnetického těsnění v dané poloze magnetické hranice kapaliny se shoduje s rozložením pole na Obr. 17a. Při čemž magnetická permeabilita je přibližně rovna  $\mu_r \approx 1$ . Je třeba poznamenat, že hodnota pole v tomto volném prostoru má vliv na povahu toku tekutiny v důsledku silné závislosti viskozity na hodnotě magnetické indukce  $B$  [13, 14].

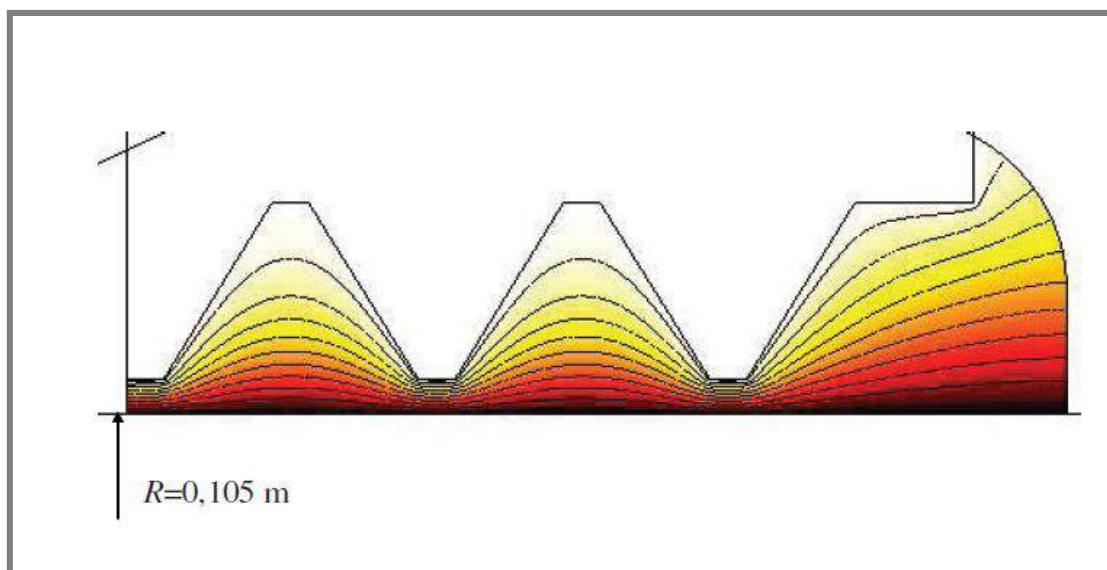


Obr. 17 Rozložení magnetické indukce v mezeře mag. těsnění [14]

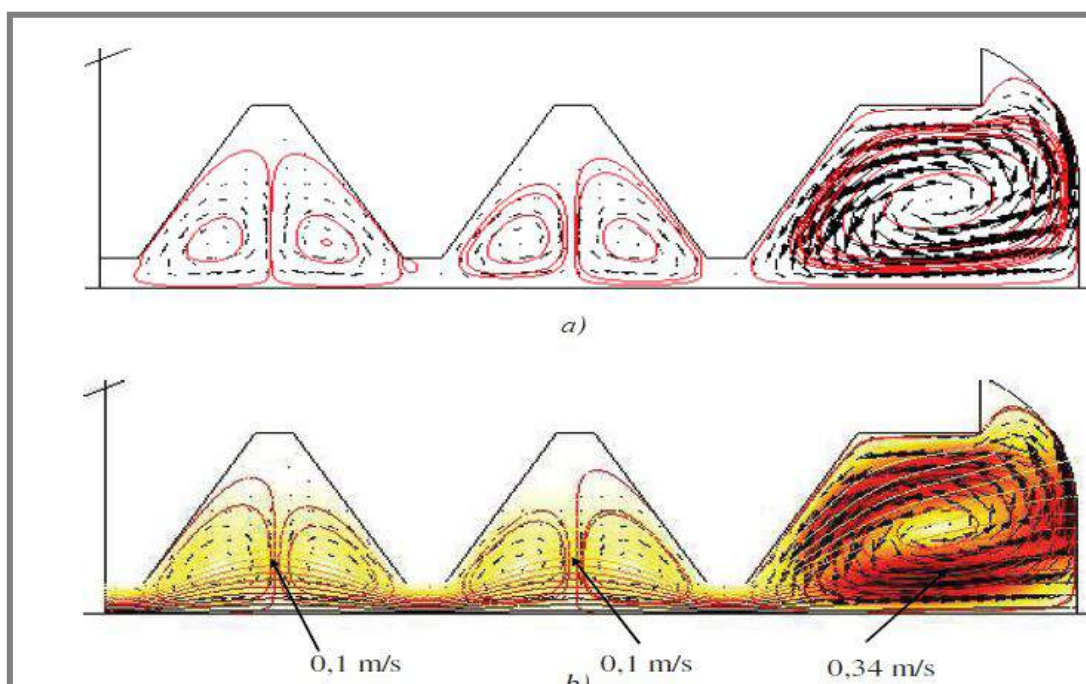
3. Dle rozložení magnetické indukce byla přiřazena každé oblasti hodnota dynamické viskozity [13, 14].

Při řešení hydrodynamického problému bylo zjištěno, že dochází ke vzniku vírů zejména na bocích břitů těsnění. Autoři bohužel neuvádí, jsou-li tyto víry pozitivní z hlediska tlakové únosnosti nebo negativní. Tyto víry dosahují poměrně vysokých rychlostí Obr. 19 [13, 14].





Obr. 18 Rozložení rychlosti proudění v tečném směru rotace hřídele [14]



Obr. 19 Rozložení rychlosti proudění v rovině řezu [14]

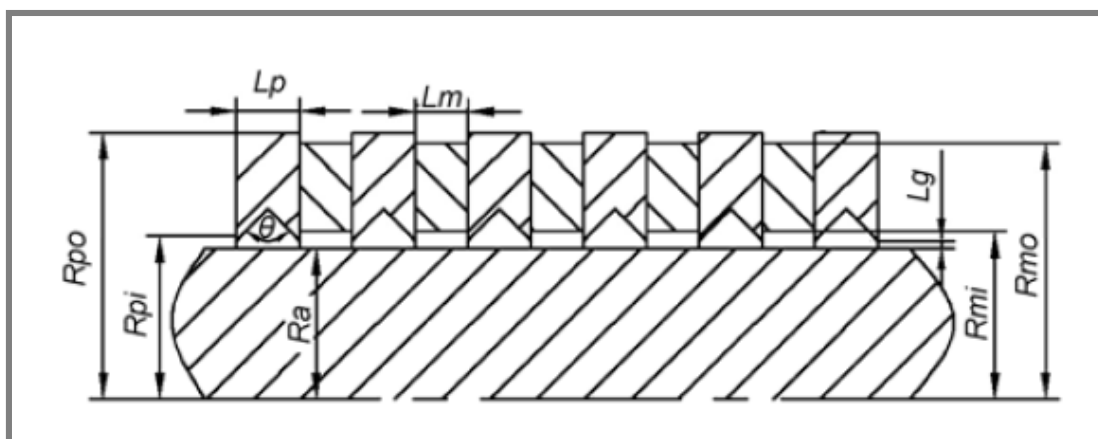


## 2.2.4 Tvary a rozměry zubů bříty magnetického těsnění

2.2.4

Magnetické těsnění může pracovat ve všech 3 základních zatěžovacích módech. Nejvýznamnější je ovšem ventilový mód. Při tomto módu dojde ve šterbině ventilu vlivem magnetického pole k ztuhnutí magnetické kapaliny. Vlivem vnějšího tlaku dojde na hranici stěn k porušení celistvosti a magnetická kapalina projde ventilem jako pevný celek. Tento jev nastává také u magnetického těsnění, a proto se na břitech těsnění používají různé zuby, které mají za úkol zvýšit tlakovou únosnost těsnění [11, 13].

Autoři YANG a ZHANG se věnovali návrhu magnetického těsnění s permanentními magnety pro velkou těsnicí mezeru o velikosti (0,4 až 0,7) mm [10]. Při řešení tohoto problému navrhli tvar bříty s trojúhelníkovým vybráním. Dále použili pro vyšší tlakovou únosnost více břitů a permanentních magnetů Obr. 20.

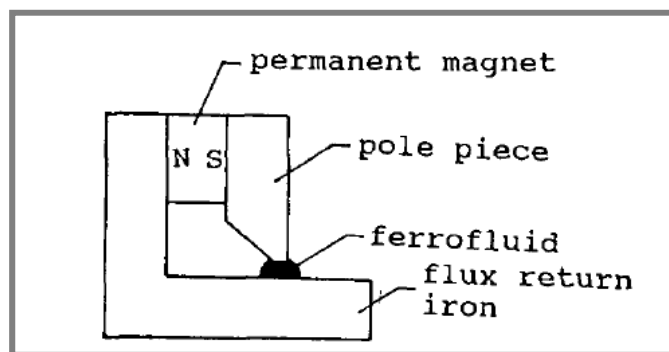


Obr. 20 Tvar bříty těsnění pro velkou mezeru [10]

Parametry	Rozměr
Vnější rádius bříty $R_{po}$	26 mm
Vnitřní rádius bříty $R_{pi}$	15,1 mm
Vnější rádius magnetů $R_{mo}$	25 mm
Vnitřní rádius magnetů $R_{mi}$	17 mm
Délka bříty $L_p$	6 mm
Délka magnetu $L_m$	5 mm
Úhel vybrání $\theta$	90 °
Mezera těsnění $L_g$	0,4-0,7 mm
Rádius hřídele $R_a$	14,4-14,7 mm

Tab. 1 Rozměry bříty [10]

Autoři Jibin a Yongping testovali magnetické těsnění se zkoseným tvarem zubu Obr. 21 [11].



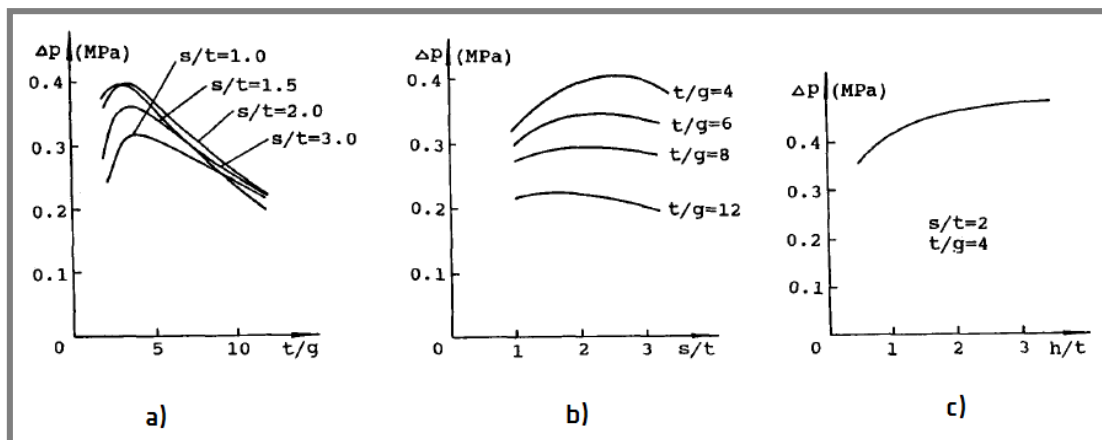
Obr. 21 Schéma standu pro test magnetického těsnění [11]

Autoři testovali vliv  $g$ ,  $t$ ,  $h$  a  $s$  na velikost magnetické indukce.

Parametry	Popis
$g$	Mezera mezi hřídelí a těsnícím břitem
$t$	Šířka zubu
$h$	Hloubka zubu
$s$	Šířka drážky

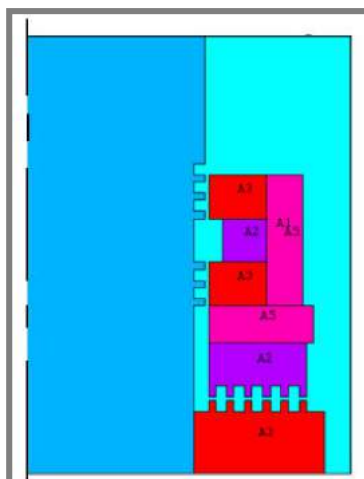
Tab. 2 Parametry zubu [11]

Po testech zjistili, že nejlepší poměr těchto parametrů pro návrh zubu magnetického těsnění je  $t/g = 4-8$ ,  $s/t = 1.5 - 3$  a  $h/t \geq 1.5$  [11].



Obr. 22 Závislost tvaru zubů na tlakovou únosnost těsnění [11]

Zuby magnetického těsnění mohou být realizovány, buď na břitech magnetického těsnění, na hřídeli nebo na obou komponentech zároveň Obr. 23[12].



Obr. 23 Ukázka MKP výpočtu těsnění turbíny [12]

Při návrhu těsnění autoři použili obdélníkový tvar zubu.

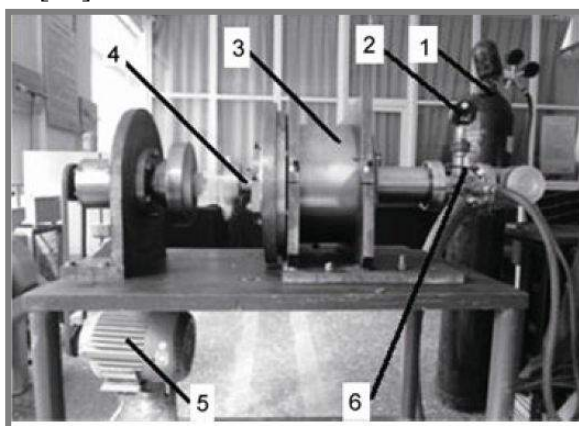
Parametry	Rozměr
Šířka zubu	1 mm
Šířka drážky	1,5 mm
Hloubka zubu	2 mm
Mezera mezi hřídelí a těsnícím břitem	0,1-0,3 mm

Tab. 3 Výsledky práce návrhu magnetické jednotky [12]

### 2.2.5 Stanovení průsaku těsnění

2.2.5

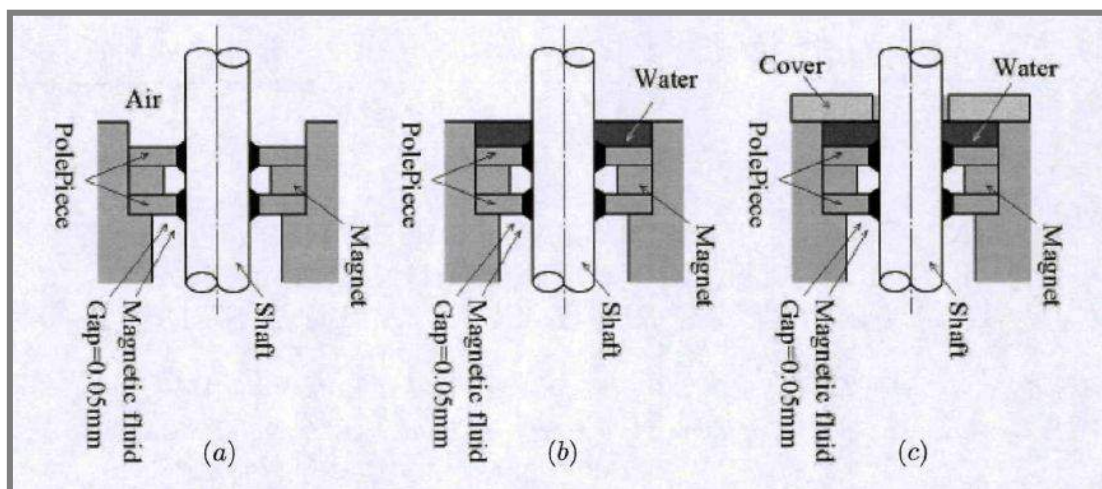
Způsob, jak zjistit, kdy přesně došlo k průsaku těsnění je obecně velký problém. Autoři YANG a ZHANG použili pro detekci průsaku heliový hmotnostní spektrometr. Přetlak v magnetickém těsnění byl realizován pomocí helia. Jakmile došlo k průsaku těsnění, helium začalo unikat z těsněné komory a to vyhodnotil hmotnostní spektrometr [10].



Obr. 24 Experimentální stand 1) tlaková nádoba, 2) tlakoměr, 3) stojan, 4) těsnění, 5) motor, 6) ventil [10]

### 2.2.6 Magnetické těsnění s krytem

Vědci z japonské univerzity v Hokkaidu navrhovali magnetické těsnění pro rotační čerpadlo krve. Hlavním cílem jejich práce bylo zjistit atributy ovlivňující životnost magnetického těsnění. Magnetické těsnění bylo nainstalováno na hřídel o průměru 3 mm. Kryt magnetického těsnění byl vyroben z nemagnetického materiálu o tloušťce 1 mm. Mezera mezi hřídelí a krytem byla 0,05 mm. Účel krytu magnetického těsnění měl být minimalizace proudění v magnetické kapalině. Testovali se 3 typy uspořádání a) na vzduchu, b) ve vodě, c) ve vodě s krytem Obr. 25. Testy ukázaly, že kryt efektivně stabilizuje proudění magnetické kapaliny a tím účinně prodlužuje životnost těsnění [15].



Obr. 25 Magnetické těsnění s krytem [15]

### 2.2.7 Magnetické těsnění s MR kapalinou

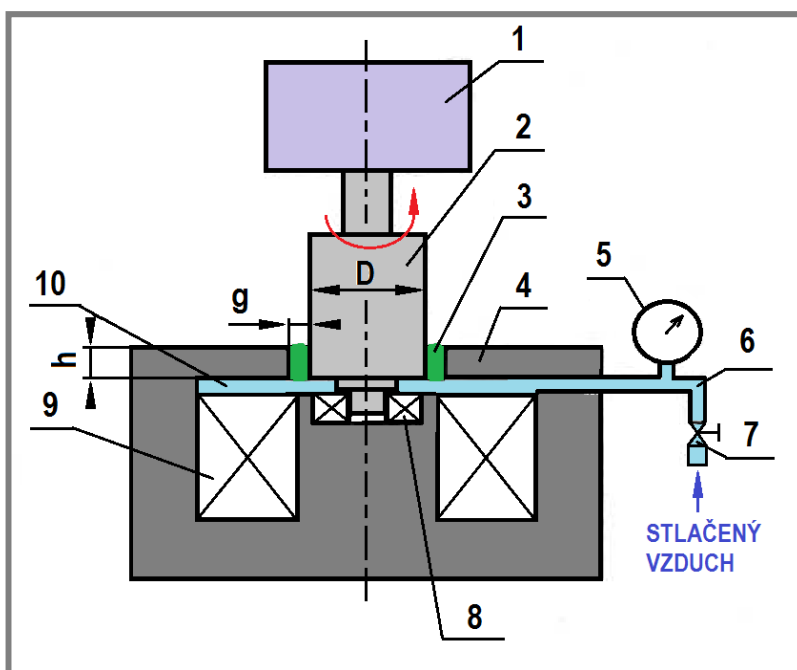
Autoři Korgonski a Potoczny zkoumali magnetické těsnění, kde těsnící mezera byla vyplněná MR kapalinou. Tato kapalina zajišťuje vysokou tlakovou únosnost. Další výhody MR kapaliny jsou: možnost práce s vysokou excentricitou hřídele, absence opotřebování dílů, možnost použití velké těsnící mezery a jednoduchá obnova těsnění. Maximální přetlak těsnění je složen ze složky plastické a magnetické [16, 17].

$$\Delta P = \Delta P_{pl} + \Delta P_{mag} \quad (11)$$

$$\Delta P = \frac{MHh\mu_0}{g} \quad (12)$$

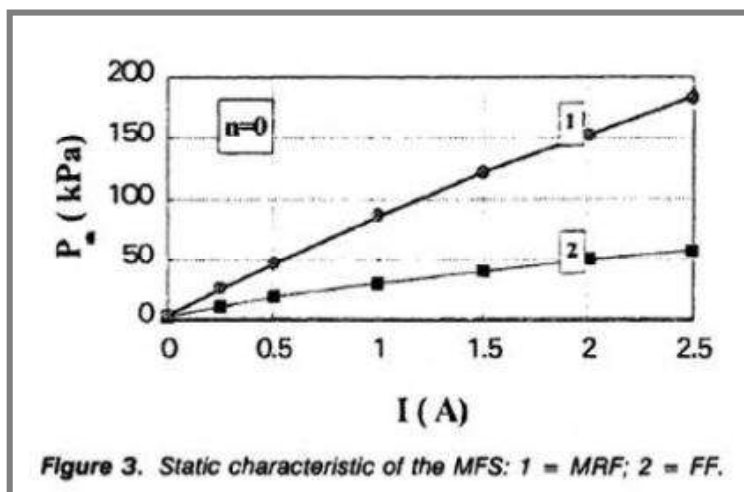
$$\Delta P_{pl} = \frac{2h\tau}{g} \quad (13)$$

Vztah pro magnetickou část přetlaku je složen z magnetizace pracovní kapaliny  $M$  [A/m], intenzity magnetického pole  $H$  [A/m], permeability vakua a geometrických charakteristik těsnění. Plastická část obsahuje smykové napětí MR kapaliny  $\tau$  [Pa], výšku olejové mezery  $g$  [mm] a šířky těsnícího břitu  $h$  [mm]. Pro testování jednotlivých parametrů bylo použito testovací zařízení, které je vyobrazeno na Obr. 26 [16].



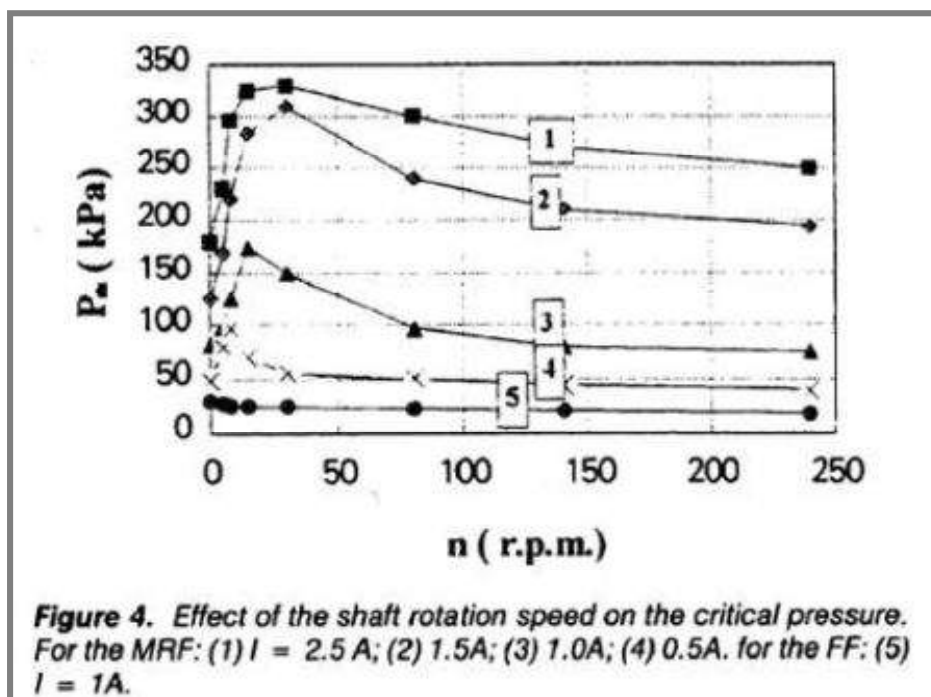
**Obr. 26** Testovací zařízení (upraveno), (1) rotační viskozimetr, (2) hřídel, (3) MR kapalina, (4) Magnetický obvod, (5) tlakoměr, (6) hadice, (7) kohout, (8) ložisko, (9) cívka, (10) přetlaková komora [16]

Hřídel měla průměr o velikosti 20 mm, břity těsnění o šířce  $h$  a velikost těsnící mezery  $g$ . Těsnící mezera  $g$  byla vyplněná MR kapalinou. Testované parametry byly v rozsahu:  $h = (1 - 10)$  mm,  $g = (0,075 - 0,15)$  mm,  $n = (0 - 240)$  1/min a  $I = (0,25 - 2,5)$  A. Z testování vyplynulo, že chování těsnění je silně závislé na použité magnetické kapalině. Výsledky z měření tlakové únosnosti ve statickém režimu lze vidět na Obr. 27 [16].



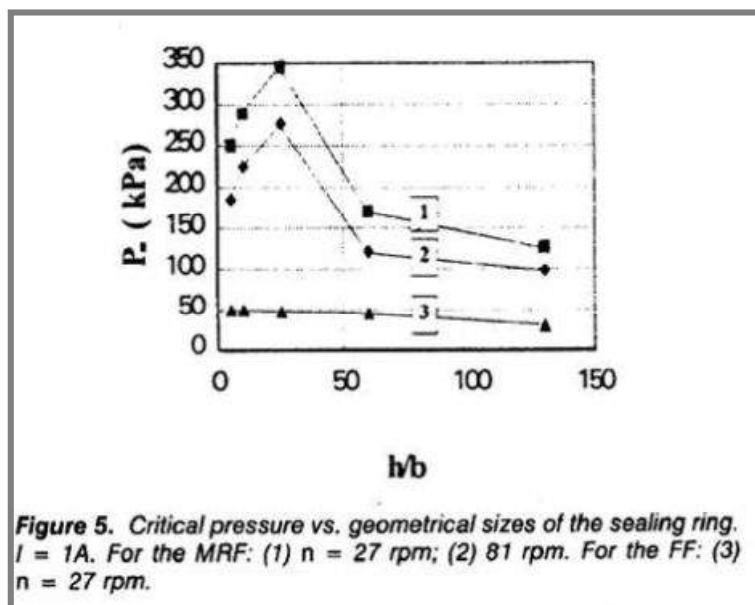
Obr. 27 Porovnání tlakové únosnosti těsnění s MR kapalinou a Ferrokapalinou [16]

Se zvyšujícími se otáčkami docházelo k nárůstu maximálního přetlaku. Po dosažení určité velikosti otáček se tlaková únosnost snižovala Obr. 28 [16].



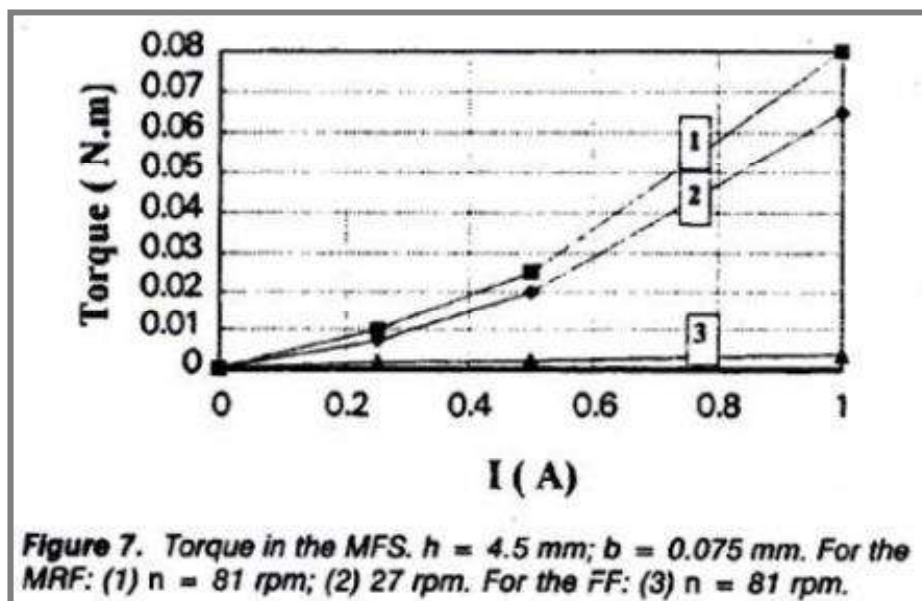
Obr. 28 Tlaková únosnost magnetického těsnění v závislosti na velikosti otáček [16]

Autoři dále zkoumali vliv geometrie těsnícího břitu. Z experimentů zjistili nejvhodnější poměr šířky břitu a velikost těsnící mezery. Z Obr. 29 lze vypožorovat, že nejvhodnější poměr  $h/g$  je přibližně 30 [16].



Obr. 29 Vliv geometrie břitu na přetlak těsnění [16]

Typické pro magnetické těsnění s MR kapalinou je značné zvýšení potřebného krouticího momentu pro pohon hřídele. Tento ztrátový moment roste se zvyšující se velikostí magnetické indukce v MR kapalině Obr. 30



Obr. 30 Velikost ztrátového krouticího momentu [16]

Velikost ztrátového momentu od MR kapaliny je oproti Ferrokapalině mnohonásobně vyšší. V statickém režimu zvládla MR kapalina oproti Ferrokapalině utěsnit přibližně trojnásobně vyšší přetlak. Při testování MR kapaliny autoři pozorovali bubliny, které se vytvářeli na povrchu MR kapaliny. Tyto bubliny by poté mohly mít za následek snížení tlakové únosnosti pokud by nebyly odstraněny.



Magnetický obvod u tohoto zařízení byl uzavírán přes kuličkové ložisko. To mohlo mít za následek nerovnoměrné rozložení magnetického pole a tím pádem i ovlivnění naměřených dat.

---

## 2.3 Zhodnocení poznatků na základě kritické rešerše

Magnetické těsnění je progresivní způsob těsnění rotačního pohybu. Oproti standardním pryžovým těsněním má mnoho výhod. Vyšší spolehlivost, nižší ztráty třením [13]. Protože je v kontaktní oblasti pouze magnetická kapalina, tak prakticky nedochází k vydírání částic v hřídeli. Magnetické těsnění se podle použité magnetické kapaliny rozděluje na Ferrotěsnění (nanočástice železa) a magnetoreologické těsnění (mikročástice železa). Ferrotěsnění jsou v praxi standardně používané a vyznačují se vysokou spolehlivostí, nízkým ztrátovým momentem při rotaci hřídele a malou tlakovou únosností. Magnetoreologické těsnění se naopak vyznačuje vysokou tlakovou únosností oproti Ferrotěsnění. Ovšem za cenu vysokého brzdného momentu při rotaci hřídele. MR kapalina je silně abrazivní a při těsnění této kapaliny standardním pryžovým těsněním dochází k velmi rychlému vydírání dosedacích ploch pod břity těsnění. To klade vysoké požadavky na tvrdost a kvalitu povrchu dosedacích ploch pod břity těsnění [18]. V odborných databázích lze poměrně snadno dohledat mnoho prací zabývajících se těsněním s permanentními magnety, které mají mezeru vyplněnou Ferrokapalinou. Prací zabývajících se magnetickým těsněním s MR kapalinami je pouze stopové množství a jejich popis je nedostatečný. Tlaková únosnost magnetického těsnění je silně závislá na velikosti těsnicí štěrby. Počtu zubů na břitu magnetického těsnění v závislosti na velikosti magnetického pole. Tlaková únosnost těsnění je také závislá na množství magnetické kapaliny v magnetickém těsnění. Ferrokapaliny na rozdíl od MR kapalin mají mnohem nižší ztrátový moment. Při použití Ferrokapaliny v magnetickém těsnění je tlaková únosnost mnohem menší než při použití MR kapaliny. V mezeře magnetického těsnění vznikají zejména na bocích břitu vířivé proudění o relativně velkých rychlostech. V průmyslových aplikacích je často používána mezera od 0,05 mm po 0,8 mm. Je ale vyžadováno, aby bylo možné těsnit i mezery větší než 1 mm [13, 14]. Se zvyšujícími se otáčkami klesá tlaková únosnost těsnění. Tato závislost je menší u těsnění s Ferrokapalinami. Využití alternativního ucpávkového módu pro magnetické těsnění, by mohlo velmi dobře eliminovat nevýhody magnetického těsnění s MR kapalinou a efektivně tak využít výhody těchto kapalin. Je zde možné také využití levnějších MR kapalin s velkými částicemi.



### 3 CÍL PRÁCE, VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA

3

---

#### 3.1 Cíl práce

3.1

---

Hlavním cílem je experimentální stanovení provozních parametrů rotačního magnetoreologického hřídelového těsnění. V práci bude nutné stanovit vliv otáček a velikosti magnetického pole v aktivní zóně na ztrátový moment a tlakovou únosnost.

Dílčí cíle:

- úprava konstrukce testovacího standu,
- magnetický a konstrukční návrh magnetického obvodu těsnění,
- sestavení metodiky měření ztrátového momentu,
- sestavení metodiky měření tlakové únosnosti.

#### 3.2 Vědecká otázka

3.2

---

*„Jak se magnetoreologické těsnění (mikročástice železa) chová, pokud je vystaveno přetlaku, otáčení hřídele a jak si povede ve srovnání se standardně používaným Ferromagnetickým hřídelovým těsněním (nanočástice železa)?“*

#### 3.3 Pracovní hypotéza

3.3

---

*„Tlaková únosnost a velikost ztrátového momentu magnetoreologického těsnění je závislá na velikosti těsnicí mezery, velikosti magnetické indukce v aktivní zóně, návrhu magnetického obvodu, použité magnetoreologické kapaliny a velikosti otáček hřídele“*

#### 3.4 Odůvodnění nutnosti a potřeby řešení

3.4

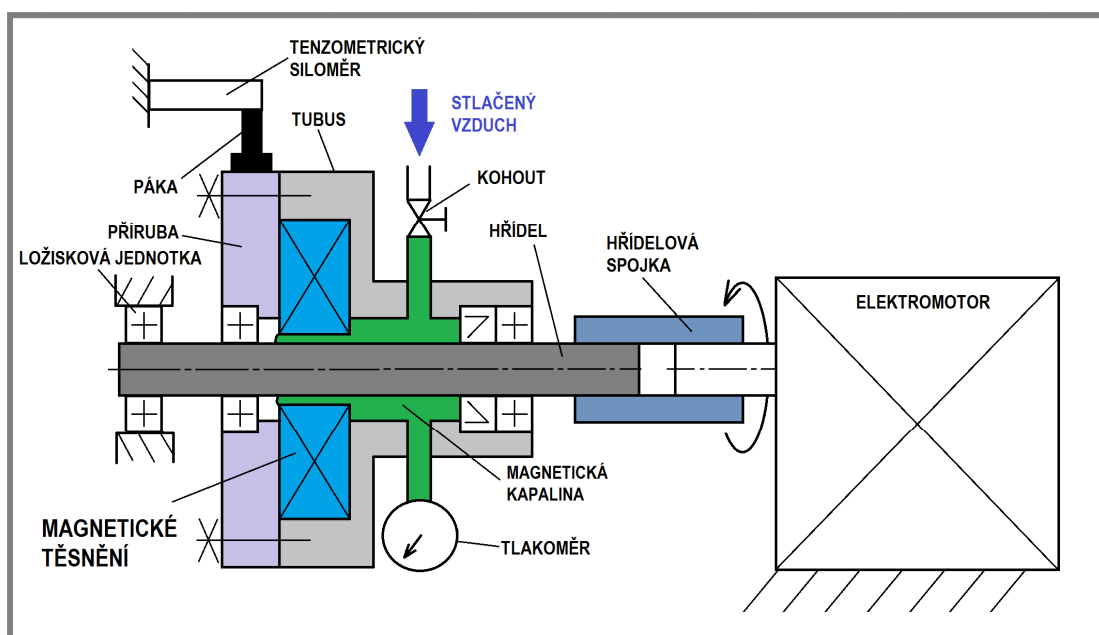
---

Použití magnetoreologického těsnění se jeví jako zajímavý kandidát pro aplikace požadující hermetické oddělení těsněného prostoru od okolí s vysokou tlakovou únosností. Bohužel v současné době existuje jen velmi málo prací zabývajících se provozními parametry, jako je velikost ztrátového momentu, maximální dosažitelné otáčky či velikostí tlakové únosnosti. Z tohoto důvodu je nutné zkonstruovat experimentální zařízení, metodiku testování a navrhnout magnetoreologické těsnění a otestovat provozní parametry. Zajímavou aplikací magnetoreologického těsnění by mohlo být i těsnění MR zařízení jako MR tlumiče či spojky. Výhoda by byla především, že by bylo možné těsnit přímo pracovní kapalinou. Uplatnění by našlo ovšem také v kosmických aplikacích, těsnění lodních šroubů nebo například v zařízeních pracujících s vysokým stupněm vakua.

## 4 MATERIÁL A METODY

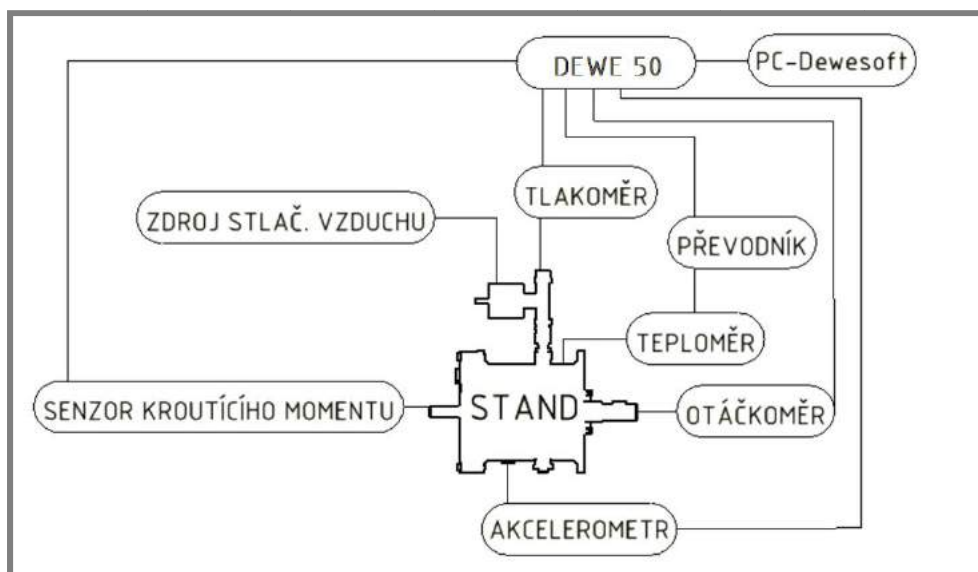
### 4.1 Experimentální zařízení

Experimentální zařízení je složeno z testovacího standu, mag. těsnění, elektromotoru a základního rámu z hliníkových profilů Bosh Rexroth. Testované magnetické těsnění se vkládá do tubusu testovacího standu. Axiálně je pojištěno přírubou. Testovací stand je z jedné strany uložen do ložiskového domku a z druhé strany je pevně spojen s hřídelí elektromotoru. Rotaci testovacího standu je zabráněno pákou, která propojuje přírubu a tenzometrický siloměr HBM DF2SR-3. Ten pak měří odporovou sílu při rotaci hřídele. Vzdálenost střední roviny siloměru od osy hřídele byla 120 mm Obr. 31.



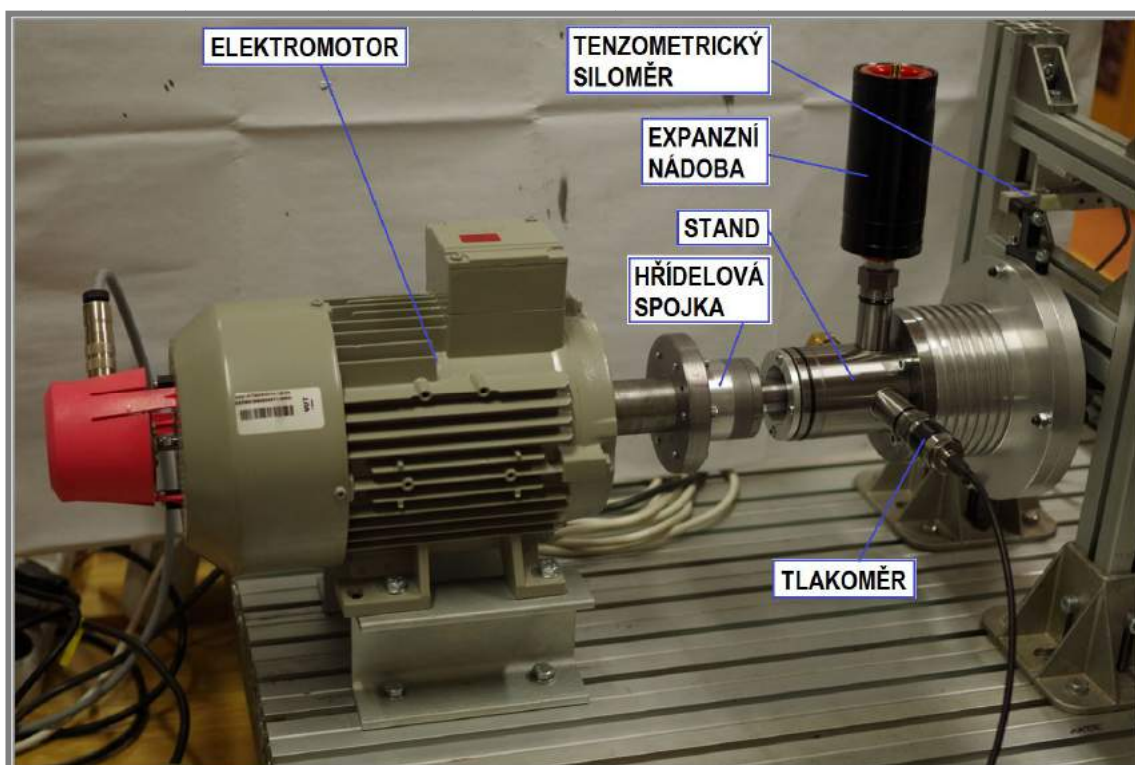
Obr. 31 Schéma experimentálního zařízení

Testovací stand Obr. 33 je k motoru připojen pomocí hřídelové spojky, náboje a svěrného pouzdra typu KLCC 24 x 34 od firmy Systém Block. Testovací stand je upnut v základním rámu profilů Bosh Rexroth. K testovacímu standu je připojena celá řada senzorů. V trubce teploměru je snímač teploty PT 100, který je připojen přes převodník s měřicí kartou. K expanzní nádobě je připojen senzor tlaku P8AP/20 bar, který je připojen opět k měřicí ústředně Dewe 50. Krouticí moment se měřil pomocí páky napojenou na siloměr HBM DF2SR-3 o nosnosti 20 kg. Všechny tyto snímače budou propojeny s měřicí kartou. Měřicí ústředna Dewe 50 předávala data do počítače, které byly zpracovány pomocí programu Dewesoft a následně v excelu. Schéma zapojení na Obr. 32



Obr. 32 Schéma zapojení zařízení

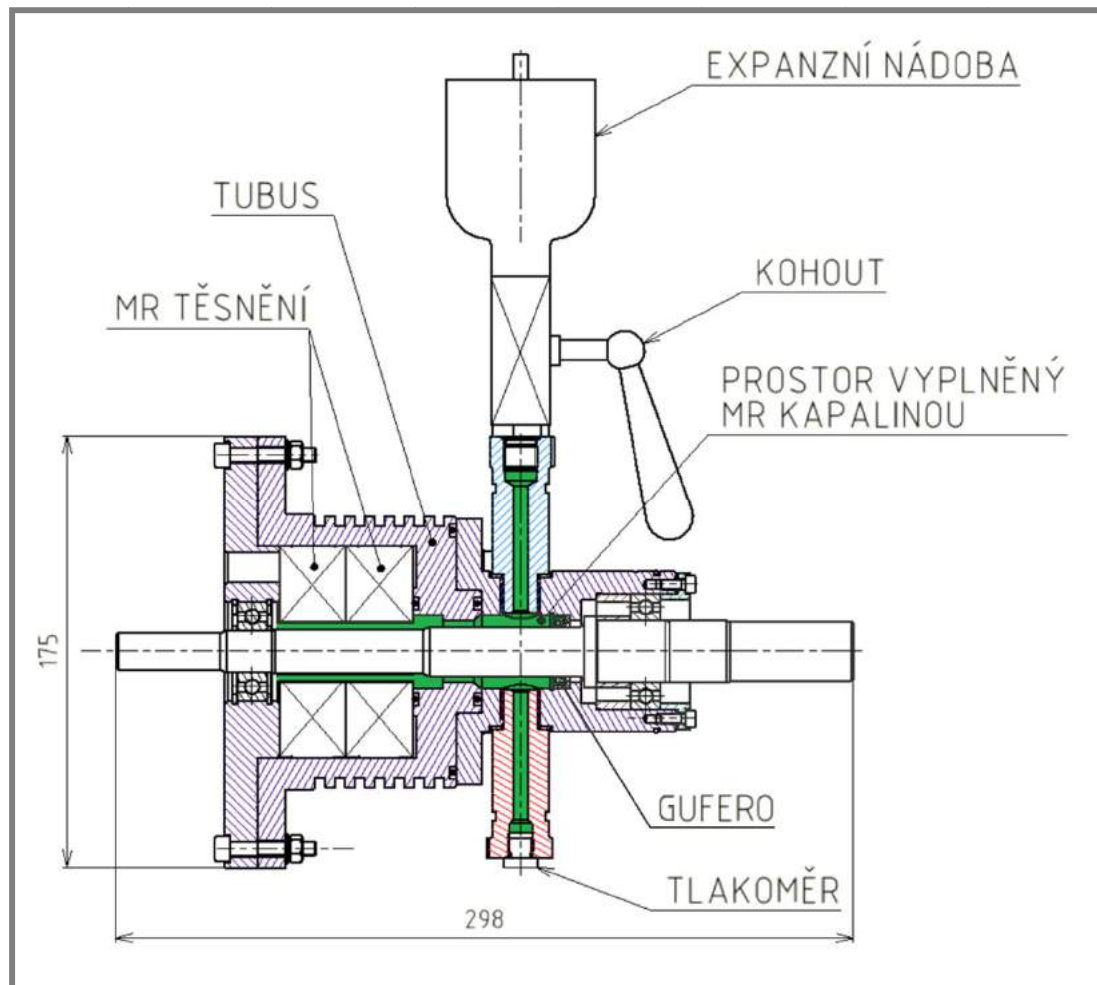
Pohon standu je realizován asynchronním elektromotorem značky SIEMENS o výkonu 1,5 kW. Otáčky motoru jsou regulovány frekvenčním měničem Sinamics G110. Tento měnič je napojen k osobnímu PC, přes který probíhá řízení.



Obr. 33 Ukázka z měření těsnění

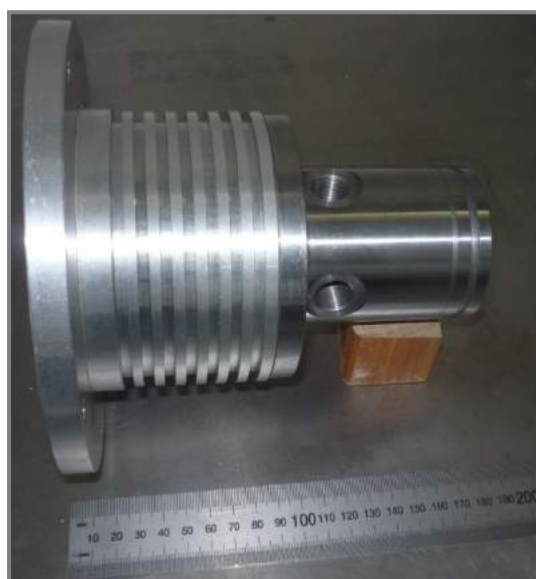
## 4.2 Testovací stand

Testovací stand se skládá ze sestavy tlakoměru, tubusu, tlakování a teploměru. Magnetické těsnění se vkládá do tubusu vyrobeného z nemagnetického materiálu. Tubus tvoří hlavní část sestavy testovacího standu. Jeho pracovní prostor je vyplněn magnetickou kapalinou, která je z jedné strany utěsněna hřídelovým těsněním s prachovkou a z druhé je testované magnetické těsnění. Do testovacího standu lze upnout a testovat až 2 těsnění zároveň.



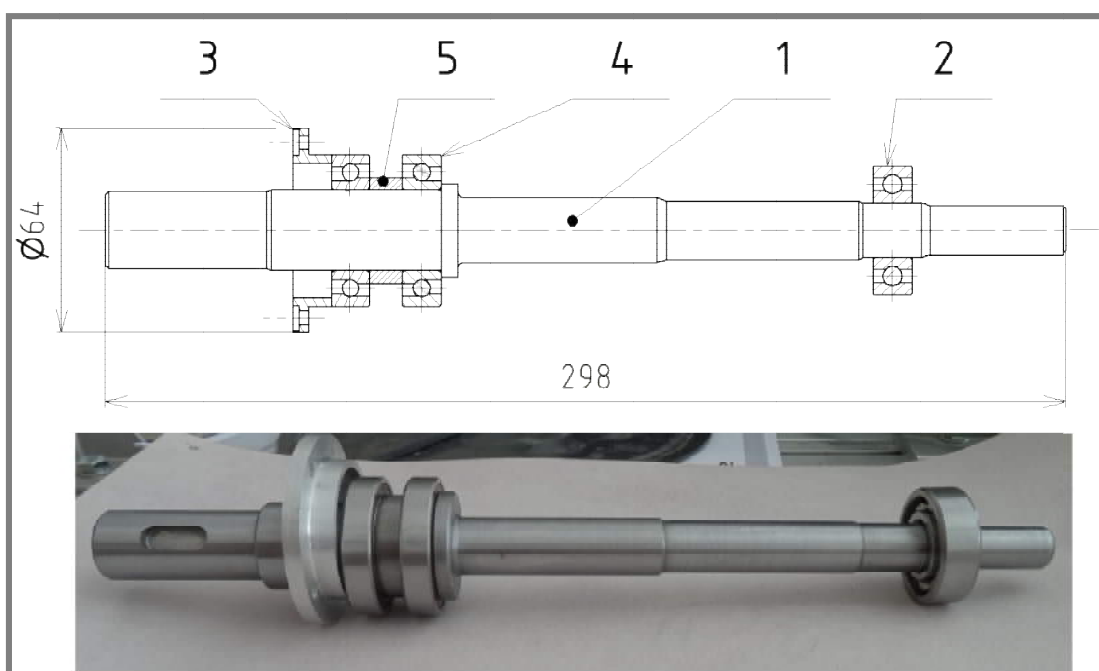
Obr. 34 Schéma testovacího standu

Aby nedošlo ke zkratu magnetického pole, je nutné magnetické těsnění uložit do části, která je vyrobena z nemagnetického materiálu. Z toho důvodu byl tubus rozdělen na dvě části. První část tubusu do které se vkládá magnetické těsnění a příruba, která zajišťuje magnetické těsnění v axiálním směru, byla vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 2030. Zbytek tubusu byl vyroben ze standardní konstrukční oceli S235 JR. Oba tubusy byly poté slisovány a sešroubovány pomocí 4 šroubů M6 Obr. 35. Aby byla zaručená co nejlepší sousost hřídele a magnetického těsnění, byly funkční dosedací plochy sestavy tubusů obráběny po lisování Obr. 35.



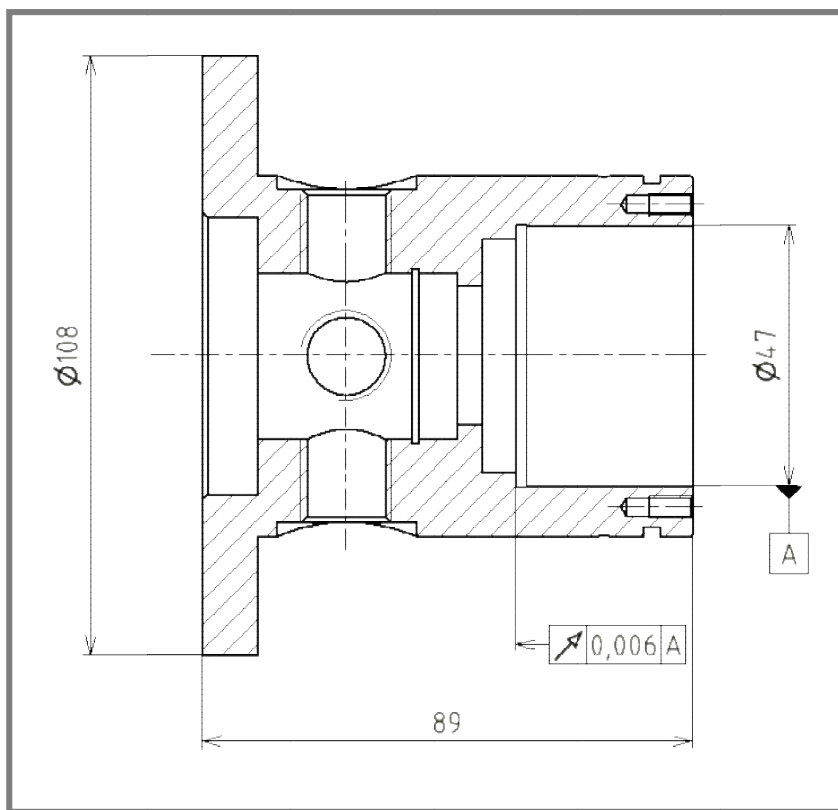
Obr. 35 Sestava tubusů [20]

Hřídel byla uložena do dvou ložisek s kosoúhlým stykem (4) a do jednořadého kuličkového ložiska (2), které se používá pouze při specifických testech. Aby došlo k vymezení vůle, byla ložiska předeprnuta ložiskovou přírubou (3) Obr. 36.



Obr. 36 Ukázka uložení hřídele

Při výrobě ocelového tubusu ovšem nedošlo k dodržení předepsané maximální hodnoty čelního házení. Předepsaná hodnota byla 0,006 mm Obr. 37.



Obr. 37 Ocelový tubus

Po naskenování a následném zpracování dat v programu GOM Inspect bylo zjištěno, že skutečná hodnota čelního házení je 0,13 mm. Bylo tedy nutné navrhnout opatření pro snížení této hodnoty.

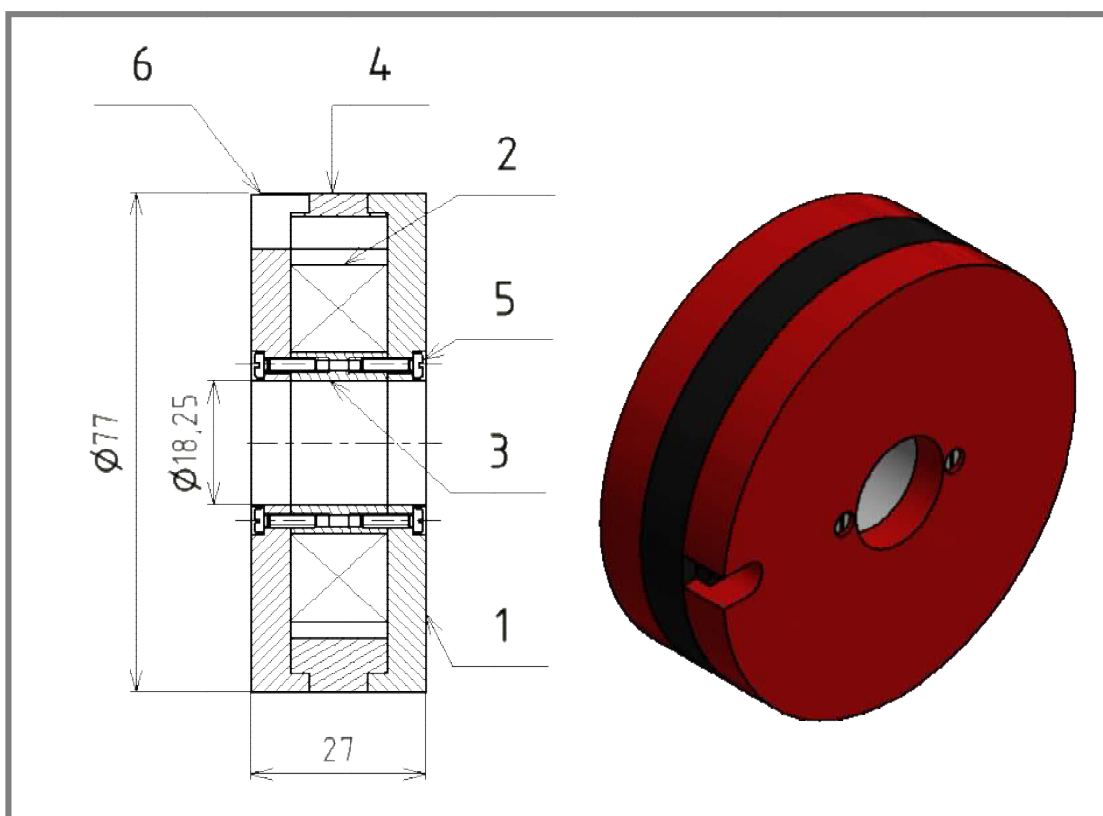
Testovací stand umožňuje testovat MR těsnění na tlakovou únosnost a ztrátový moment. MR těsnění lze testovat v následujících kombinacích zatěžovacích módů (ventilový, smykový, ventilový a smykový, ventilový a smykový a tahový-tlakový).

### 4.3 Magnetoreologické těsnění

V následujících částech jsou popsány konstrukční uspořádání různých variant těsnění s popisem výhod a nevýhod jednotlivých koncepcí.

#### 4.3.1 Varianta 1

Varianta 1 je koncept, který byl navržený vedoucím mé diplomové práce Ing. Michalem Kubíkem v rámci diplomové práce. Tato konstrukce byla výrobně jednoduchá a měla se na ní ověřit hypotéza, zda bude těsnění vůbec fungovat.

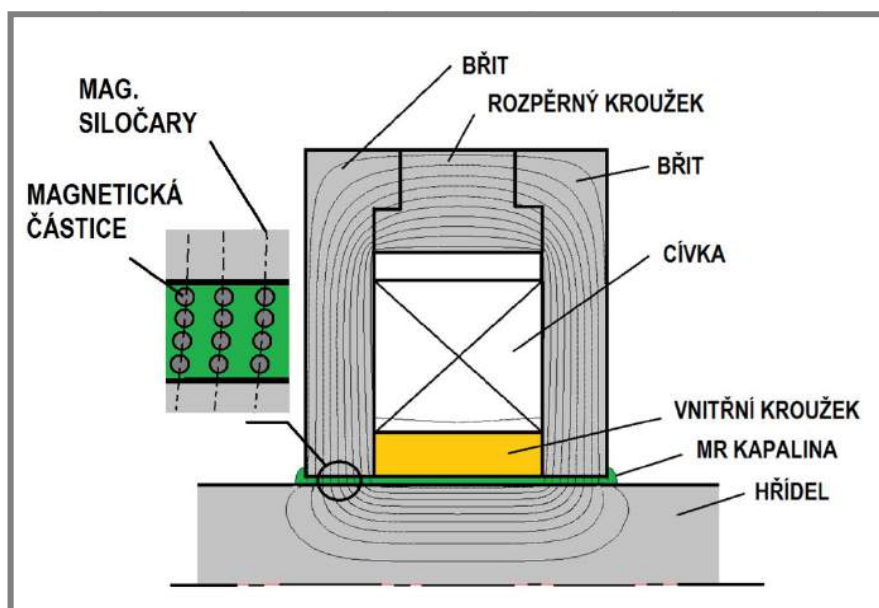


Obr. 38 MR těsnění varianta 1

Varianta 1 MR těsnění na Obr. 38 se skládala ze dvou břitů těsnění (1, 6), vnějšího vymezovacího kroužku (4) vyrobeného z feromagnetického materiálu, vnitřní nemagnetické vymezovací podložky (3) a cívky (2). Cívka byla navinuta z měděného drátu o průměru 0,6 mm a obsahovala 357 závitů. Mezera na poloměru mezi hřídelí a břitem těsnění byla 0,12 mm. Celé MR těsnění držely pohromadě čtyři šrouby (5) o velikosti M2. Vnější průměr MR těsnění se poté zalisoval do trubky, která napomáhala uzavření magnetického obvodu a zajišťovala souosost břitů těsnění. Princip funkce těsnění je zřejmý na Obr. 39 (šedá barva-feromagnetické materiály, žlutá barva-nemagnetické materiály, zelená barva-MR kapalina).

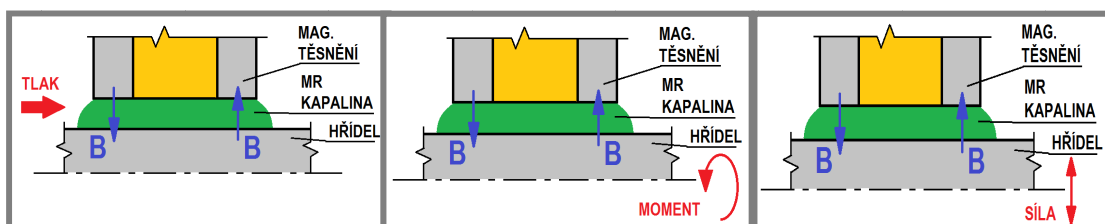
Proud procházející cívkou generuje magnetické pole, které prochází břity těsnění přes MR kapalinu do hřídele viz Obr. 39. Jakmile MR kapalina přijde do styku s magnetickým polem, dojde k vytvoření MR efektu (zřetězení magnetických částic MR kapaliny ve směru magnetických siločar). Tím dojde k vytvoření nepropustné těsnicí vrstvy, která hermeticky oddělí dvě těsněná média.





Obr. 39 Princip funkce MR těsnění varianty 1

V praxi se MR kapaliny rozdělují podle způsobu zatěžování do tří základních módů. Podle definice by pak MR těsnění mělo pracovat současně ve dvou základních zatěžovacích módech a to ve ventilovém a smykovém módu. Ventilový mód vzniká při přetlaku těsnění a smykový mód vzniká otáčením hřídele. V praxi ovšem vlivem vibrací či nesouosostí hřídele dochází k zapojení i třetího tahově-tlakového módu Obr. 40.



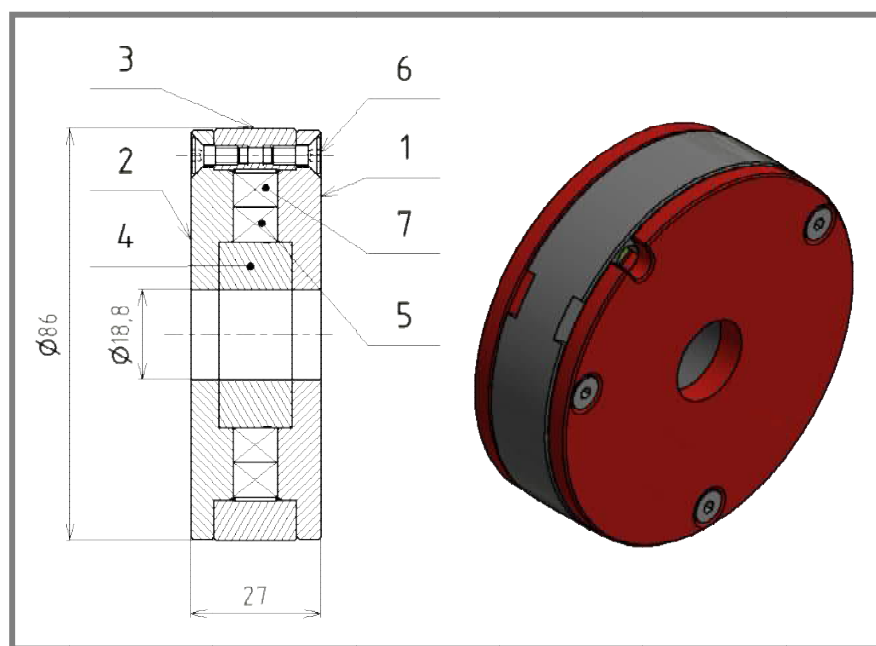
Obr. 40 Ventilový mód (vlevo), Smykový mód (uprostřed), Tahový-tlakový mód (vpravo) MR těsnění

Tato koncepce se ukázala jako nevyhovující, protože bylo těžké dosáhnout dostatečné souososti vnitřních průměrů břitů těsnění. Dále docházelo k dotyku hřídele s břitem těsnění při rotaci hřídele. To znemožnilo testování dynamické tlakové únosnosti. Vnější trubka, do které se těsnění lisovalo a měla napomáhat uzavírání magnetického obvodu, byla zbytečná a uzavírání magnetického pole pomocí vnějšího kroužku (4) se ukázalo jako dostatečné. Dále bylo podezření, že šrouby M2 (5) ovlivňují tok magnetického pole a jeho rozložení v aktivní zóně.

#### 4.3.2 Varianta 2

Při testování varianty 1 nebylo možné testovat tlakovou únosnost těsnění, protože docházelo k dotyku hřídele s břitem těsnění. Z tohoto důvodu bylo nutné konstrukčně upravit jak uložení hřídele, tak i samotné MR těsnění. Varianta 2 je tedy konstrukčně optimalizovaná varianta 1. Vzhledem k snadnější montáži, výrobě dílu a maximální souososti hřídele a MR těsnění.





Obr. 41 MR těsnění varianta 2

V předešlé variantě se dosahovala souosost jednotlivých břitů nalisováním do středící trubky, která zároveň napomáhala uzavírat magnetický obvod. U této koncepce se ukázalo, že je problém vyrobit břity s dostatečně velkou souosostí. Z tohoto důvodu došlo k odstranění středící trubky a břity těsnění (1,2) se zalisovaly mezi vnitřní (4) a vnější rozpěrný kroužek (3). Aby se předešlo stržení závitu, který byl původně navržen v hliníkovém vnitřním rozpěrném kroužku (4). Posunuly se závity do vnějšího ocelového kroužku (3). Závity se navíc nachází v oblasti, kde se hodnota magnetické indukce blíží nule. Díky tomu se mohly použít větší šrouby M4 aniž by jakkoliv ovlivňovaly magnetické pole. Pro citlivější regulaci magnetického pole, byly do MR těsnění navinuty 2 cívky (5,7), které lze napájet jednotlivě a nebo obě zároveň. Cívky byly navinuty z měděného drátu o průměru 0,5 mm. Na vnitřní cívce bylo navinuto 100 závitů a na vnější cívce bylo navinuto 150 závitů.

Aby byla dosažena maximální souosost vnějšího a vnitřního průměru MR těsnění, byl na jednom břitu navrhnut upínací nákrůžek Obr. 42. Za tento nákrůžek se po slisování těsnění upnulo do soustruhu a obrobil se vnější a vnitřní průměr těsnění jako sestava. Tím bylo dosaženo maximální souososti. Nákrůžek se po této operaci odstranil.



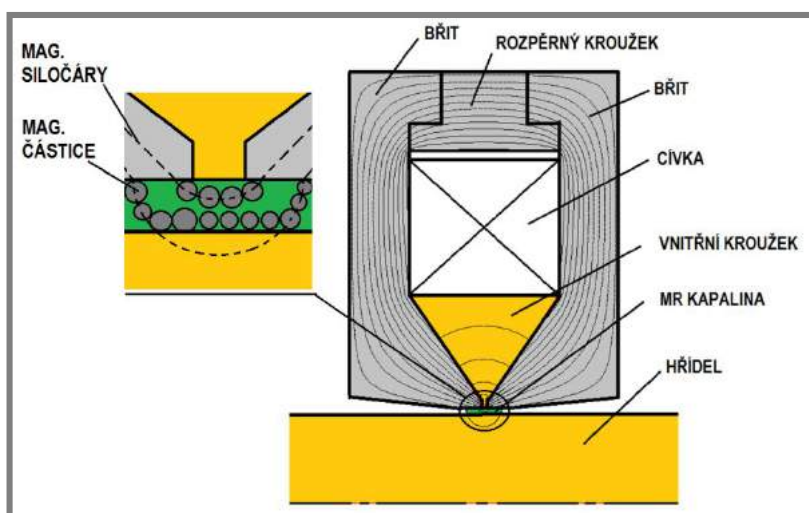
Obr. 42 Ukázka upínacího nákrůžku



Obr. 43 Ukázka MR těsnění varianta 2

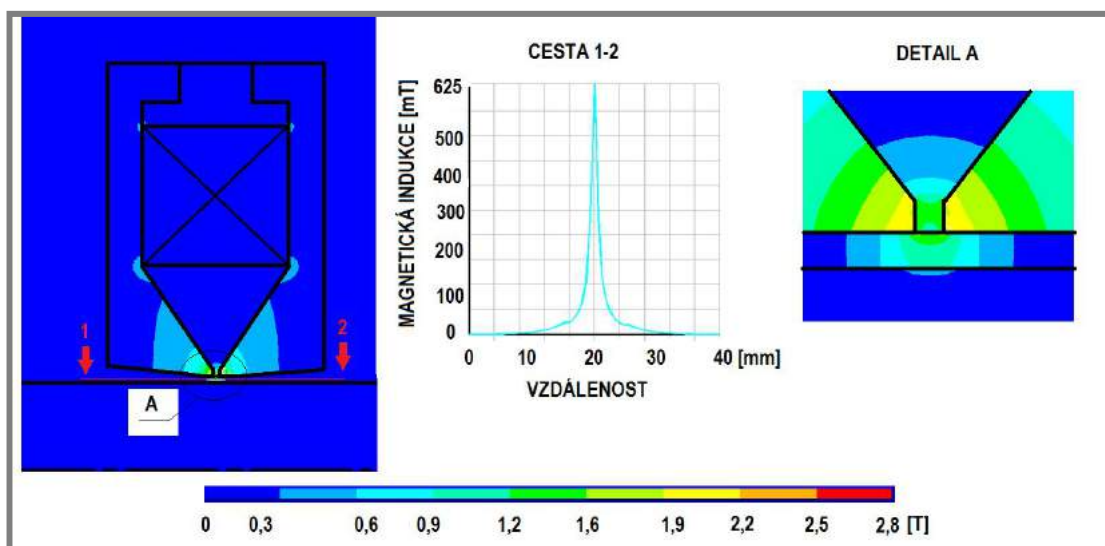
### 4.3.3 Varianta 3

Konstrukce tohoto typu těsnění vznikla po celé řadě testů varianty 1 a 2, protože se vyskytly následující problémy. Mezi hlavní nevýhody MR těsnění bezesporu patří jeho velký ztrátový moment. Ztráty MR těsnění jsou způsobeny převážně vlivem smykového módu. Aby mohlo dojít k rotaci hřídele, je nejprve nutné přetrhnout řetězce magnetických částic. To způsobí vytvoření velkého brzdného momentu. Z toho důvodu byla snaha navrhnout takové těsnění, které nepracuje ve smykovém módu. To znamenalo opustit standardní návrh MR těsnění a navrhnout zcela nový magnetický obvod. MR těsnění, které je konstrukčně postavené podobně jako MGP ventil, ovšem pracuje v kombinaci dvou alternativních zatěžovacích módů (svěracího a ucpávkového). Tato nová konstrukce byla identifikována jako Magneto-Rheology-Gradient-Pinch-Seal (Magnetoreologické gradientní svěrné těsnění) dále jen MRGPS. Obrovskou výhodou tohoto těsnění je absence smykového módu, který je zodpovědný za obrovský ztrátový moment těsnění. Princip těsnění je možné vidět na Obr. 44 (šedá barva-feromagnetické materiály, žlutá barva-nemagnetické materiály, zelená barva-MR kapalina).



Obr. 44 Princip funkce MR těsnění varianty 3

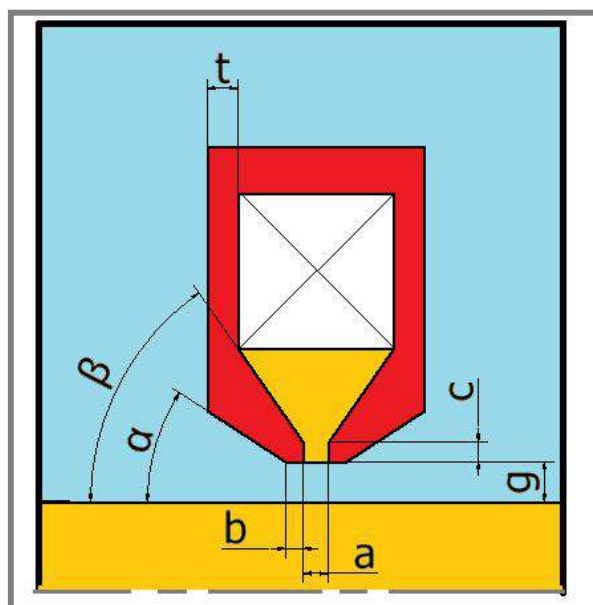
Odlišnost této koncepce od konvenčního magnetického těsnění je v uspořádání břitů a uzavření magnetického obvodu. Předchozí verze využívaly k uzavření magnetického obvodu hřídel. To mělo několik zásadních nevýhod. Hřídel byla velmi rychle nasycena magnetickým polem. To snižovalo velikost mag. indukce v mezeře těsnění a jeho tlakovou únosnost. Další výrazný problém byl ten, že magnetické částice pevně spojily hřídel a břity těsnění. Aby mohlo dojít k otočení hřídele, bylo nutné překročit mez kluzu MR kapaliny. To velmi zvyšovalo potřebný výkon pro rotaci hřídele. U této varianty je hřídel nemagnetická. To znamená, že je potřeba uzavírat magnetický obvod přiblížením břitů těsnění na minimální vzdálenost přes MR kapalinu. Při dostatečně malé vzdálenosti břitů dojde k vybočení magnetických siločar do osy hřídele. V této oblasti se nachází magnetická kapalina, která bude oddělovat dvě těsněná média. Protože u této koncepce je absence smykového módu, znamená to, že ztrátový moment tohoto těsnění bude vytvářet pouze tření MR kapaliny o hřídel (kapalinové tření).



Obr. 45 Rozložení magnetické indukce v MR těsnění varianta 3

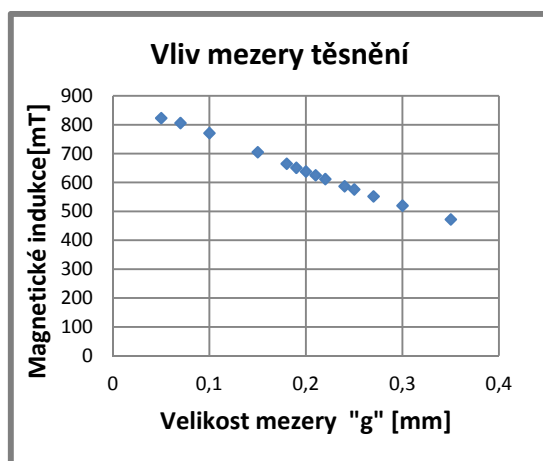
Tím dojde k eliminaci hlavní nevýhody magnetického těsnění. Další výhodou tohoto těsnění je imunita vůči zkratu magnetického obvodu, protože hřídel je nemagnetická.

Aby bylo možné navrhnout parametry těsnění, byla provedena citlivostní analýza parametrů pomocí statické MKP analýzy rozložení magnetického pole v mezeře magnetického těsnění, znázorněných na Obr. 46.

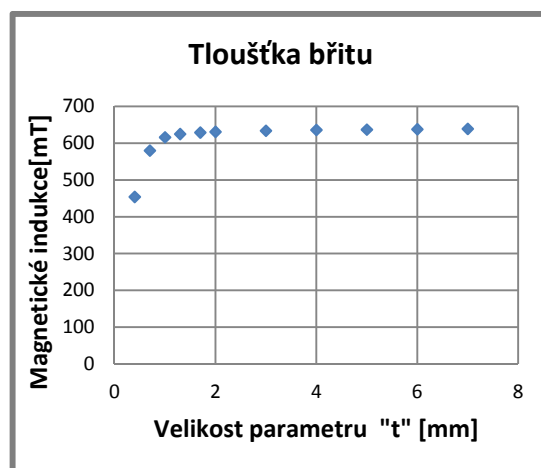


Obr. 46 Testované parametry MR těsnění

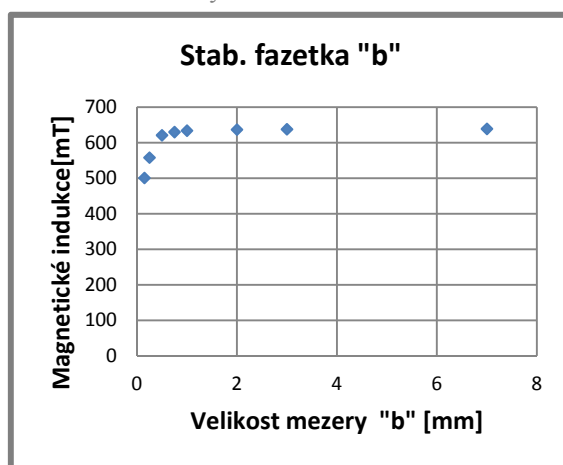
Optimalizace jednotlivých parametrů magnetického těsnění byla provedena tak, aby velikost magnetické indukce u povrchu hřídele dosahovala co největší hodnoty. Měřila se maximální velikost magnetické indukce pod břity těsnění v těsné blízkosti povrchu hřídele. Závislost jednotlivých parametrů na velikosti indukce lze vidět na Obr. 47 až Obr. 53.



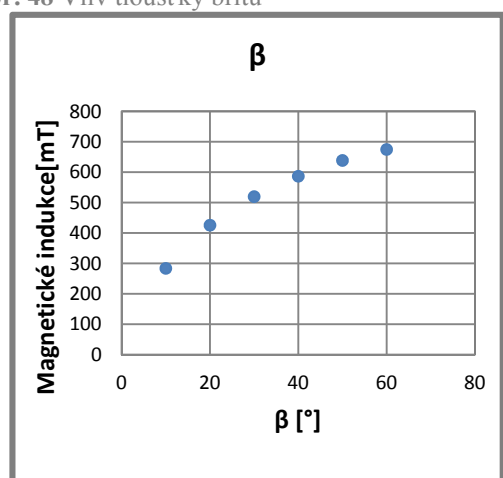
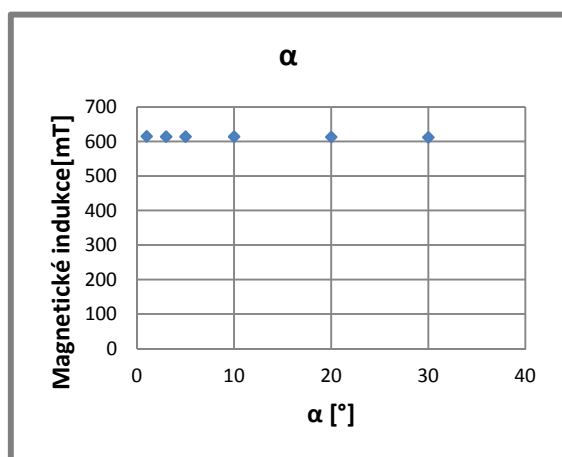
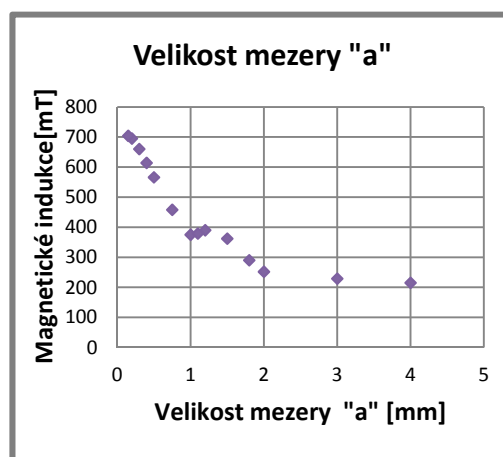
Obr. 47 Vliv mezery těsnění



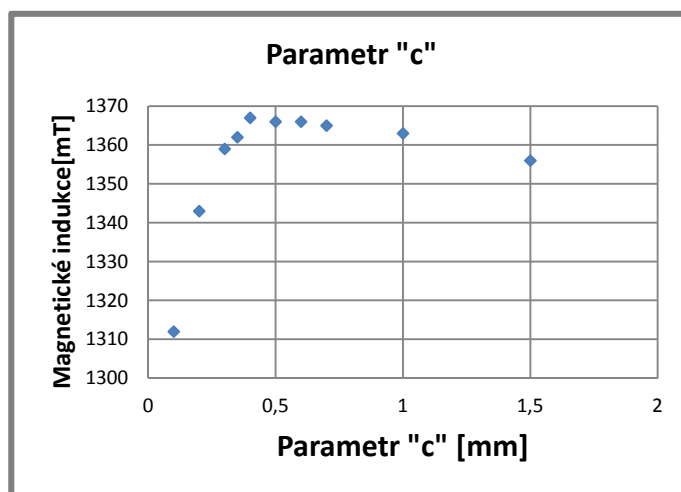
Obr. 48 Vliv tloušťky břitu



Obr. 49 Vliv stabilizační fazetky

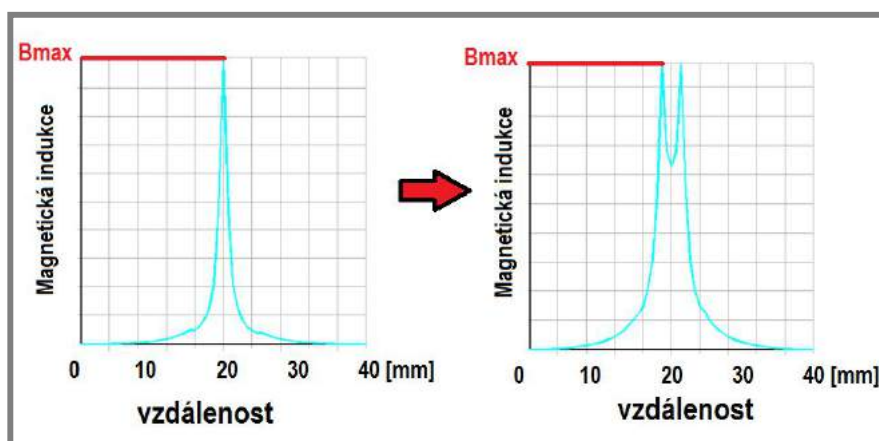
Obr. 50 Vliv úhlu  $\beta$ Obr. 51 Vliv úhlu  $\alpha$ 

Obr. 52 Vliv parametru a



Obr. 53 Vliv parametru c

Zajímavý je průběh velikosti parametru "a", kdy od hodnoty o velikosti cca 1 mm dojde k rozdělení křivek průběhu velikosti magnetické indukce. To má za následek mírné zvýšení její velikosti viz Obr. 54.

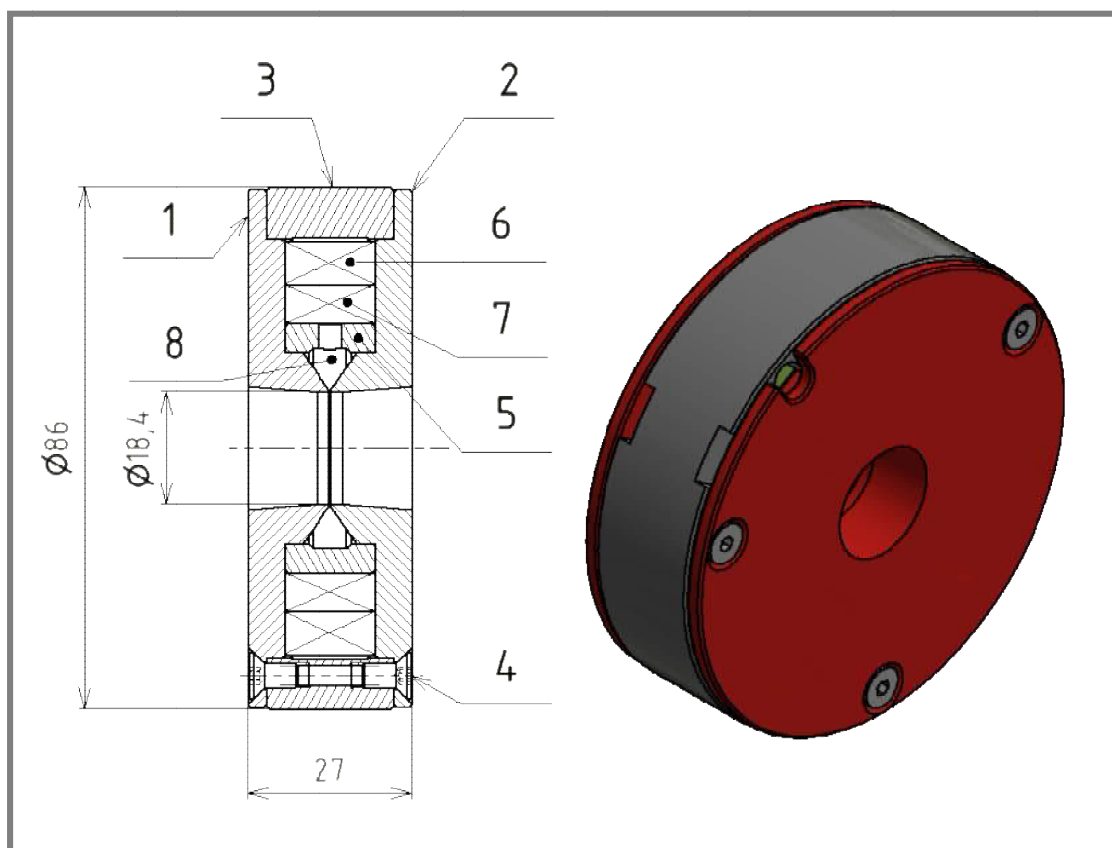


Obr. 54 Průběh velikosti magnetické indukce pro parametr a

Z citlivostní analýzy byly vybrány doporučené parametry pro návrh tohoto typu magnetického těsnění.

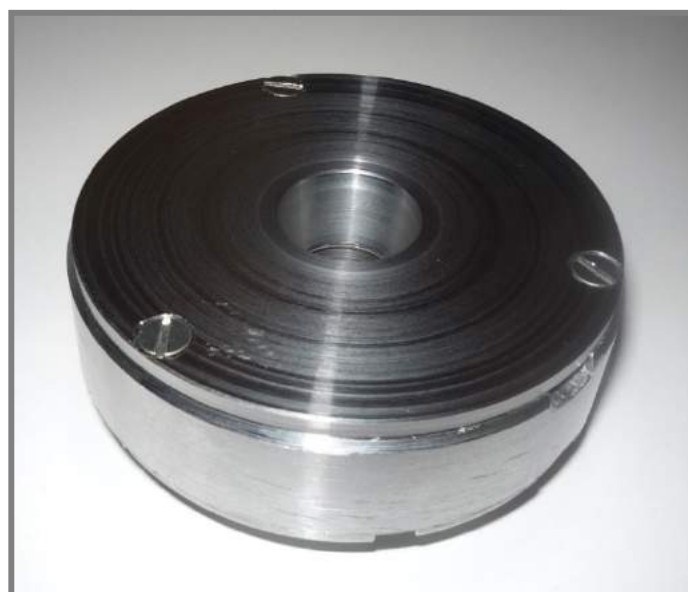
Parametr	Doporučená hodnota	Popis
b	> 1 mm	stabilizuje a zvyšuje velikost <b>B</b>
c	0,35 až 0,7 mm	zvyšuje velikost <b>B</b> a stabilizuje rozměry bříty
a	0,25 až 0,35	silná závislost na velikost a průběh <b>B</b> v mezeře těsnění
$\beta$	> 45 °	posouvá oblast výskytu <b>B</b> směrem k ose hřídele
$\alpha$	5 až 10 °	zjednodušuje a zlevňuje výrobu břitů
g	< 0,35	silná závislost na velikost a průběh <b>B</b> v mezeře těsnění

Tab. 4 Vypočtené hodnoty parametrů pro MR těsnění varianta 3



Obr. 55 Navržené magnetické těsnění

Výrobní postup těsnění byl obdobný jako u varianty 2, kde se obráběl vnější a vnitřní průměr těsnění na jedno upnutí na soustruhu. U této varianty se ještě musel po obrobení vyplnit prostor mezi břity těsnění silikonovým tmelem LUKOPREN S 9780.

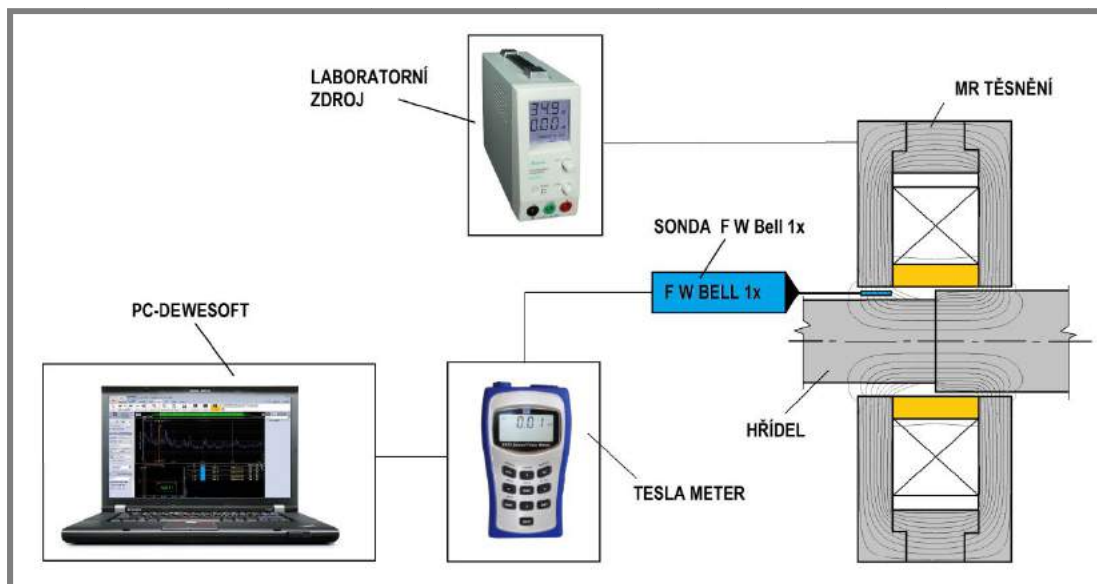


Obr. 56 Ukázka nově navrženého (MRGPS) těsnění

## 4.4 Metodika měření magnetického pole

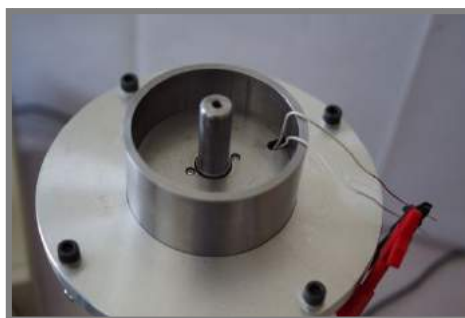
Pro stanovení provozních parametrů MR těsnění je potřeba znát velikost magnetické indukce v aktivní zóně v MR kapalině. Problém je ten, že magnetická indukce se nedá měřit přímo v MR kapalině. Je to z toho důvodu, že materiál sondy má relativní permeabilitu shodnou se vzduchem. Z toho důvodu jsme schopni hodnotu velikosti magnetické indukce získat pouze magneto-statickou analýzou pomocí MKP. Pro zpřesnění výpočtu je potřeba matematický model verifikovat. To bylo provedeno měřením magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Měření magnetické indukce bylo realizováno pomocí Tesla metru Tectra 5180. K Tesla metru byla připojena ultra tenká Hallova sonda FW BELL. Tato sonda pracuje na principu Hallova jevu. Jelikož sonda má výšku 0,6 mm, bylo nutné zvětšit mezeru mezi břity a hřídelí. To bylo provedeno posunutím MR těsnění do místa, kde se mění průměr na hřídeli. Schéma zapojení lze vidět na Obr. 57



Obr. 57 Schéma měření magnetické indukce u těsnění se zvětšenou mezerou

Měřil se průběh maximální velikosti magnetické indukce pod břitem MR těsnění v závislosti na procházejícím proudu. Získané průběhy se poté porovnály s MKP výpočtem.

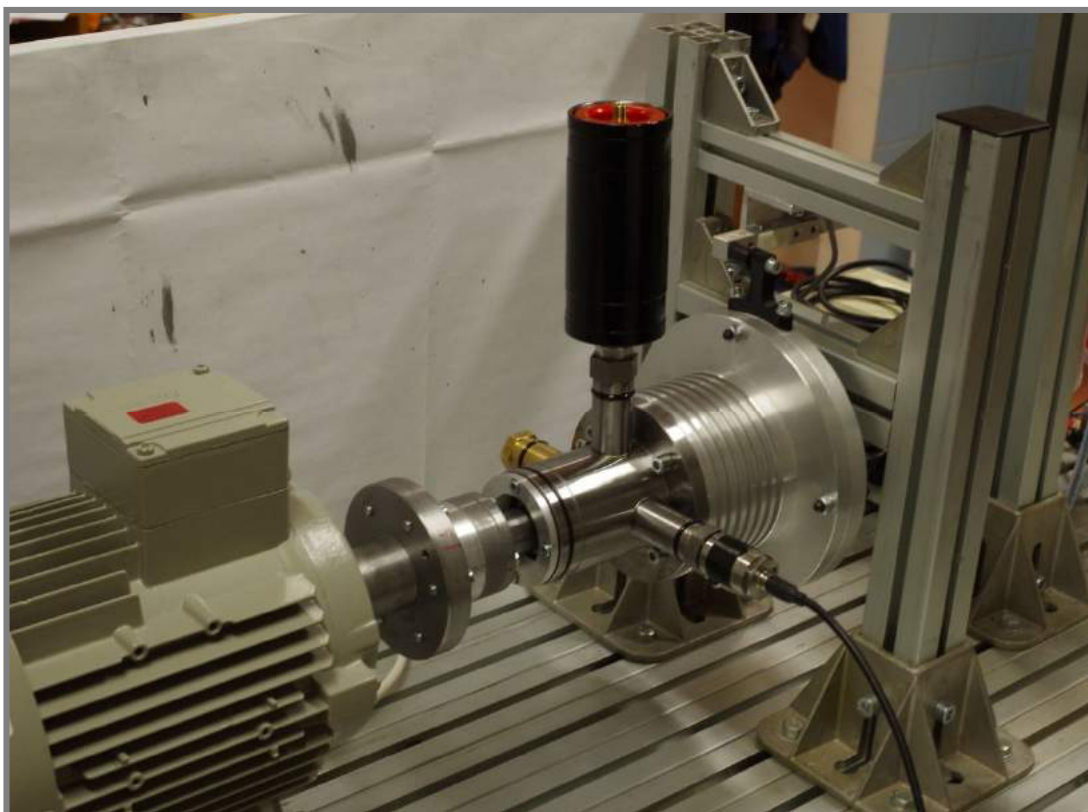


Obr. 58 Ukázka z měření magnetické indukce



## 4.5 Metodika testování ztrátového momentu

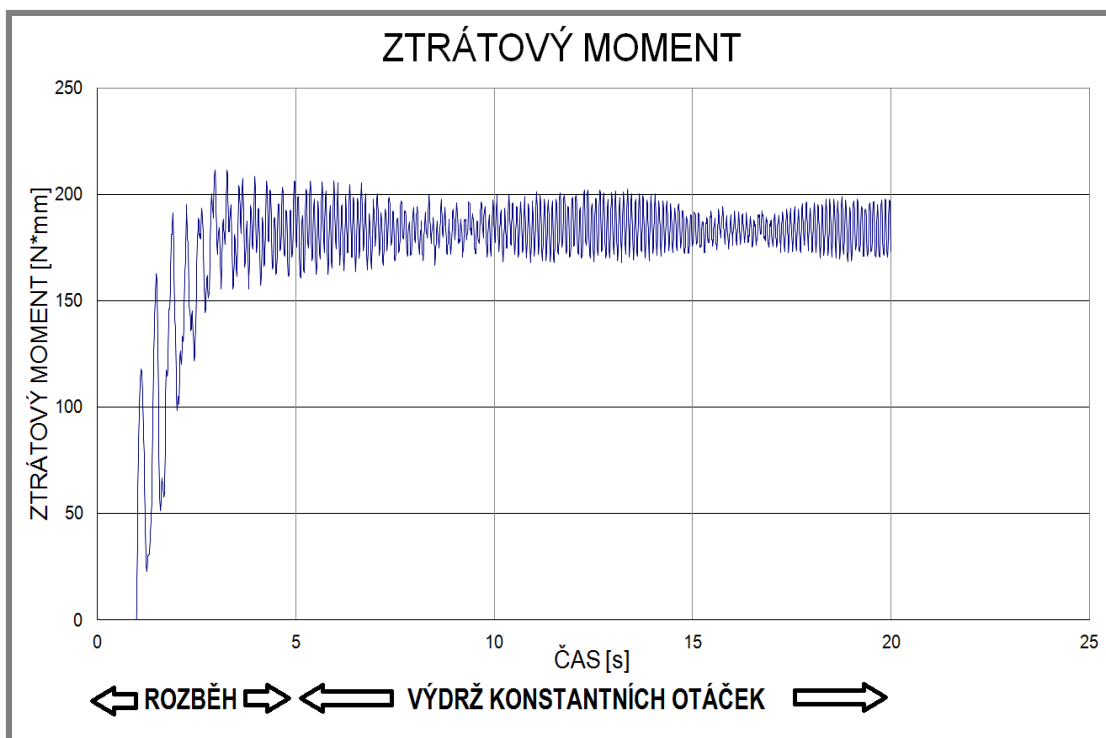
Ztrátový moment MR těsnění se měří pomocí páky, která je spojená s přírubou standu a na druhém konci s tenzometrickým siloměrem od firmy HBM typ DF2SR-3. Při rotaci hřídele vzniká v MR těsnění velký brzdný moment, který je zachycován reakční silou v tenzometrickém siloměru. Vzhledem k tomu, že siloměr má měřicí rozsah do 20 kg, byla snaha měřit pokud možno co největší sílu. Z toho důvodu byl tenzometrický snímač umístěn co nejblíže osy rotace hřídele. Protože při rotaci hřídele vlivem nevyváženosti hřídele a rotoru motoru vznikají vibrace. Je mezi pákou a siloměrem umístěn silentblok, který má za úkol tlumit tyto vibrace. Naměřená data byla zpracovávána v programu DEWesoft a následně v Excelu.



Obr. 59 Ukázka z testování ztrátového momentu

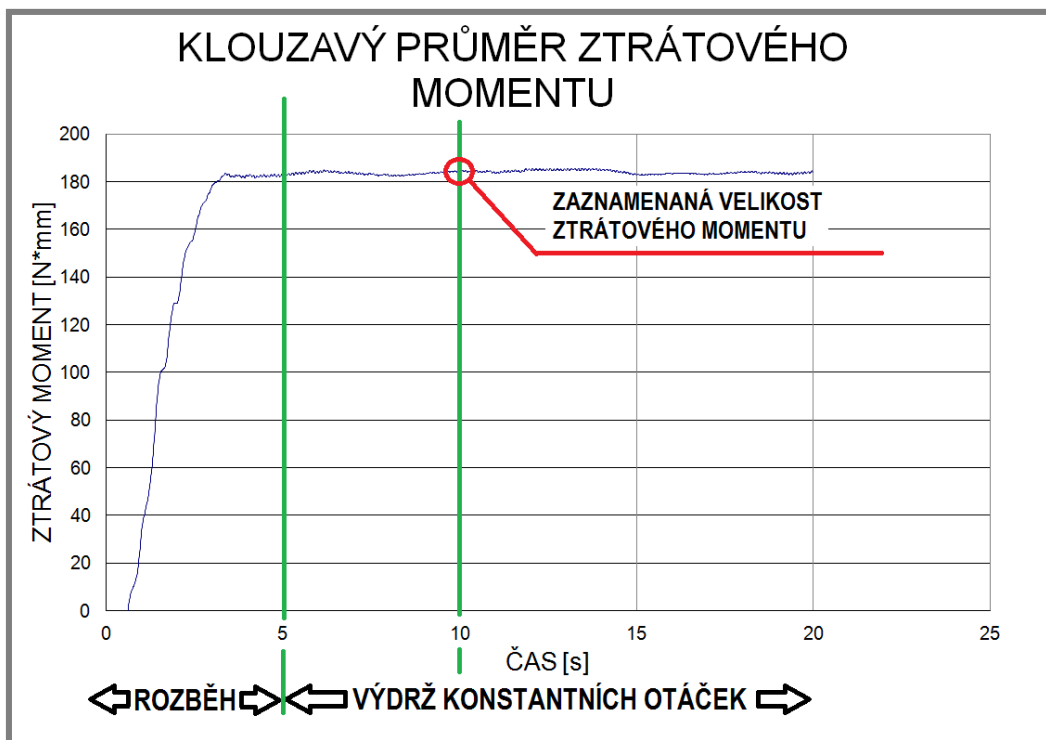
Při měření ztrátového momentu byla vzorkovací frekvence 100 Hz. Měření ztrátového momentu se skládalo z rozběhu a výdrži elektromotoru na určité frekvenci otáčení. Výdrž elektromotoru na konstantních otáčkách byla minimálně 15 s Obr. 60





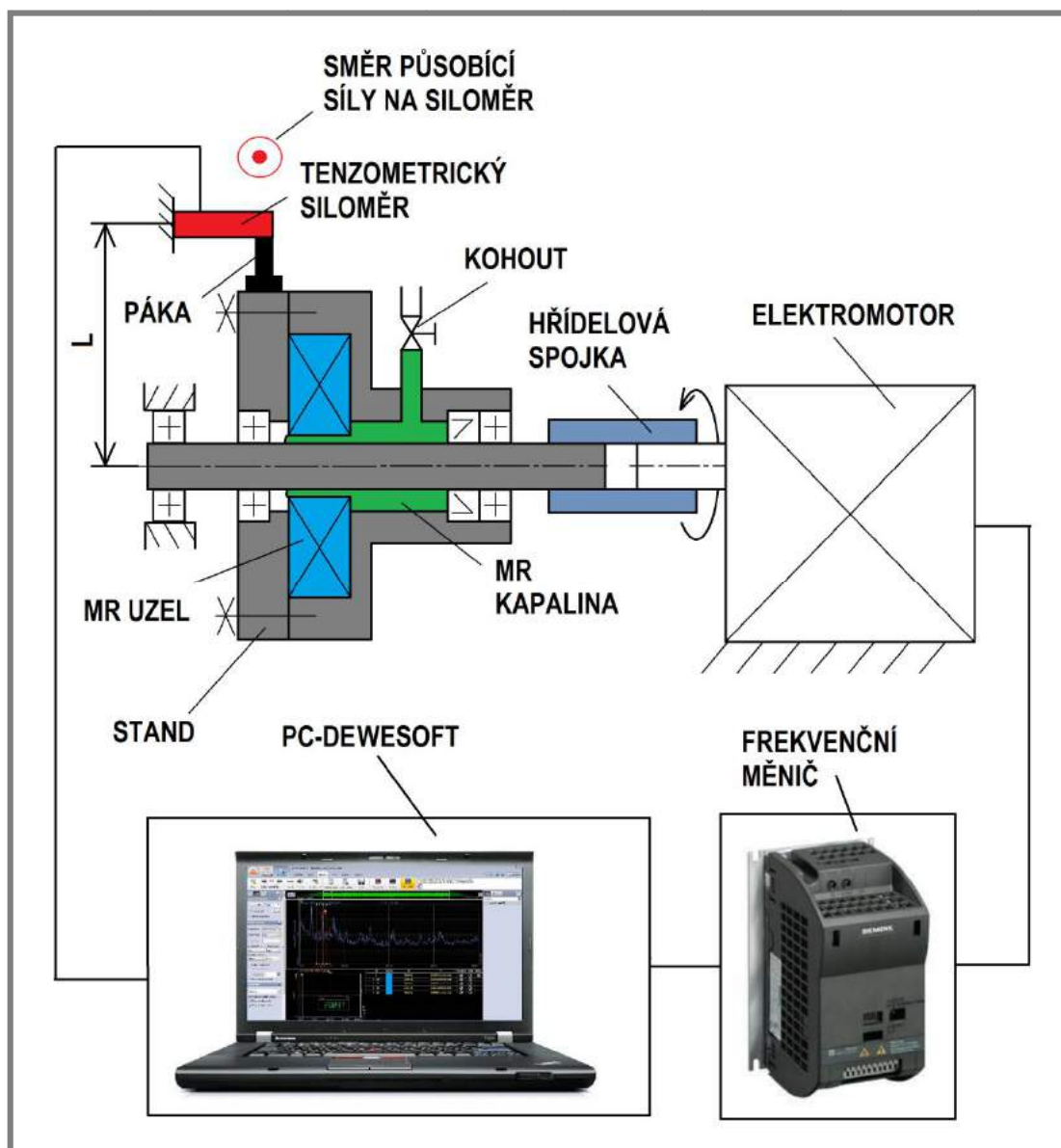
Obr. 60 Ukázka naměřených dat ztrátového momentu

Tato naměřená data byla poté z DEWEsoftu exportována do excelu a vyhlazena pomocí klouzavého průměru o velikosti 101 hodnot. Velikost ztrátového momentu byla stanovena tak, že po ustálení frekvence otáčení hřídele byla po 5 s zaznamenána hodnota ztrátového momentu Obr. 61



Obr. 61 Vyhlazená data ztrátového momentu

Testovací stand obsahuje pryžové těsnění a ložiska, které sami o sobě vyvíjí ztrátový moment. Pro zjištění přesného ztrátového momentu MR těsnění, byly proto v první fázi nejprve změřeny ztráty samotného testovacího standu. V druhé fázi se měřily celkové ztráty testovacího standu s MR těsněním. Poté se od těchto dat odečetly ztráty samotného standu. Schéma zapojení měřicího řetězce lze vidět na Obr. 62.



Obr. 62 Schéma zapojení měřicího řetězce při měření ztrátového momentu

Hřídel testovacího standu je uložena z jedné strany do ložiskového domku a z druhé je pevně spojena přes hřídelovou spojkou s hřídelí elektromotoru. Při rotaci hřídele testovacího standu vzniká v MR těsnění a v testovacím standu ztrátový moment.

Tento moment je zachycen pákou, která je napojená na tenzometrický siloměr. Siloměr poté měří sílu potřebnou pro udržení standu v konstantní poloze. Měřená síla je poté přepočítána na ztrátový moment.

$$M_z = FL \quad (14)$$

Kde  $M_z$  je velikost ztrátového momentu [Nm],  $F$  je naměřená síla [N] a  $L$  je velikost ramena = 0,12 m

Hřídel testovacího standu je poháněna asynchronním elektromotorem značky SIEMENS o výkonu 1,5 kW. Otáčky motoru jsou regulovány frekvenčním měničem Sinamics G110. Tento měnič je napojen k osobnímu PC, přes který probíhá řízení. Síla je měřena ohybovým tenzometrickým siloměrem HBM DF2SR-3, 20 kg.



Obr. 63 Ukázka připojení tenzometrického siloměru

Tento siloměr byl připojen k osobnímu PC. Při měření optimalizované varianty 3 těsnění, které má ztrátový moment mnoho násobně menší než původní varianta, bylo nutné umístit tenzometrický siloměr co nejblíže osy hřídele, aby se zvětšila měřená velikost síly. Vzdálenost působíště reakční síly na siloměr od osy hřídele poté byla 24,75 mm.



Obr. 64 Uchycení siloměru na lící straně příruby

#### 4.5.1 Kalibrace a nastavení snímačů

Při rotaci hřídele vzniká vlivem nevyváženosti hřídele a rotoru motoru velké množství nežádoucích vibrací, které zkreslují měřená data. Většina těchto vibrací je utlumena silentbloky. Zbylá část vibrací, která se přenese do snímače je odfiltrována dolní propustí. Parametry nastavení tenzometrického siloměru lze vidět v Tab. 5

Název	Hodnota
Tenzometrický siloměr	HBM DF2SR-3/20kg
Typ filtru	Butterworth
Hranice dolní propustě filtru	10 Hz
Max napětí můstku	5V
Kalibrační rovnice	$y[N.mm]=2428x[V]$

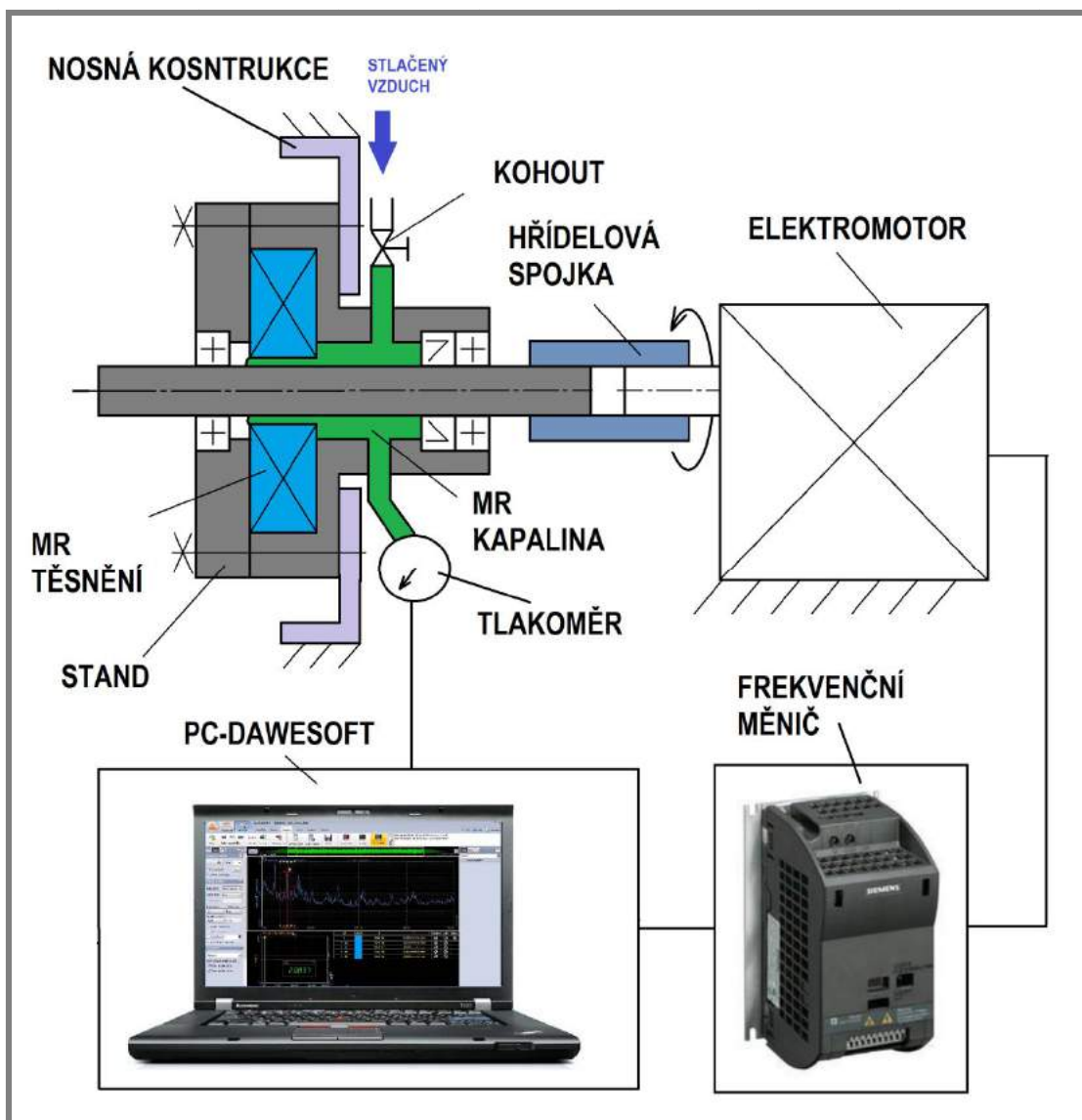
Tab. 5 Nastavení tenzometrického snímače

Název	Hodnota
Tlakoměr	P8AP/20 bar
Max napětí můstku	5V
Kalibrační rovnice	$y[bar]=50,23x[V]-25,47$

Tab. 6 Nastavení tlakoměru

#### 4.6 Metodika testování tlakové únosnosti těsnění při různých otáčkách

Nejdůležitější provozní parametr magnetického těsnění je schopnost těsnit přetlak. Při testování tlakové únosnosti byla testována celá řada metod. Jako nejvýhodnější metoda se ukázala ta, že se nastaví konstantní otáčky a velikost procházejícího proudu cívkou. Poté se bude postupně zvyšovat přetlak na těsnění. Průsak těsnění se projeví okamžitým snížením přetlaku, který zaznamená tlakoměr. Testovací stand je pevně upnut v nosném rámu. Přetlak těsnění je poté vyvolán expanzní nádobou. Aby se snížily ztráty MR kapaliny při průsaku těsnění, je mezi testovacím standem a expanzní nádobou umístěn kohout, který se po natlakování těsnění okamžitě uzavře. Aby nedocházelo k přenosu vibrací z motoru na hřídel testovacího zařízení, je spojení výstupní hřídele motoru a hřídele testovacího standu realizováno pružnou svěrnou hřídelovou spojkou COUP-LINK LK20-C40S. Schéma zapojení měřícího řetězce je znázorněno na Obr. 65. Hřídel testovacího standu je poháněna asynchronním elektromotorem značky SIEMENS o výkonu 1,5 kW. Otáčky motoru jsou regulovány frekvenčním měničem Sinamics G110. Tento měnič je napojen k osobnímu PC, přes který probíhá řízení. Přetlak těsnění je zaznamenáván tlakoměrem P8AP/20 bar, který byl napojen k osobnímu PC a zpracováván v programu DEWESoft.

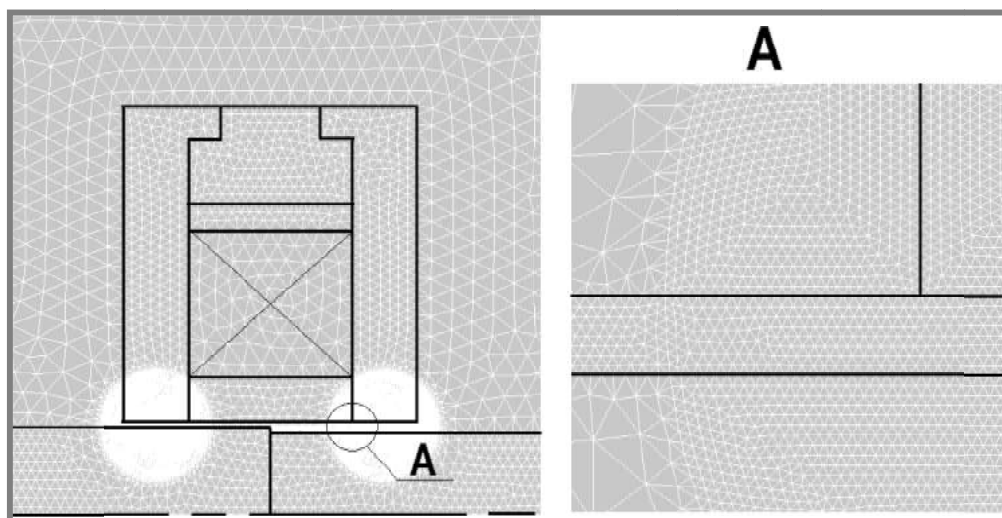


Obr. 65 Schéma zapojení měřicího řetězce při měření tlakové únosnosti

## 5 VÝSLEDKY

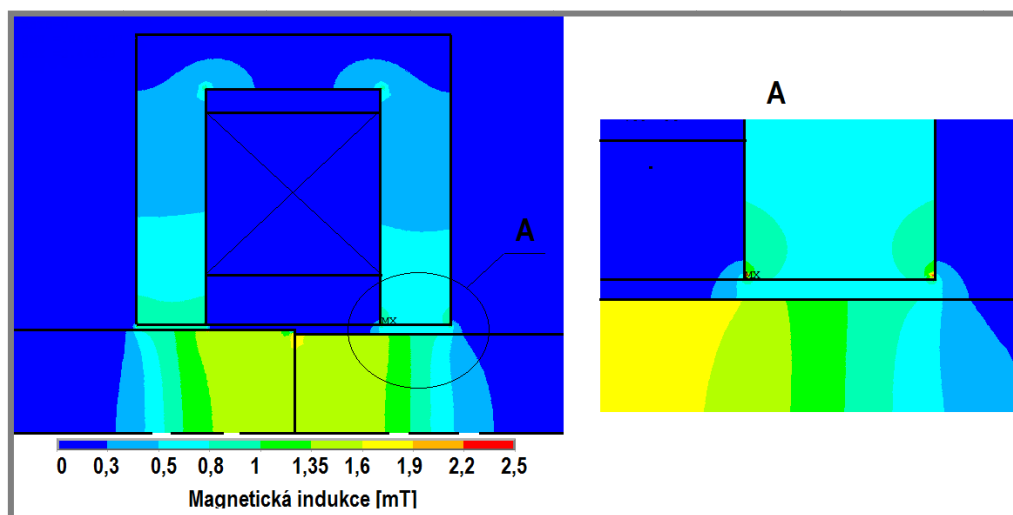
### 5.1 Měření magnetické indukce

Při návrhu magnetického těsnění se vychází z magneto-statické analýzy v systému Ansys Classic. Výpočty byly prováděny jako 2D úloha s využitím axisymetrie. Geometrie pro MKP analýzu (plochy a křivky) byla vytvořena v programu Autodesk Inventor Professional, která byla po vytvoření exportována přes skript v modulu iLogic do formátu IGES. Tento soubor byl poté importován do programu Ansys Classic.

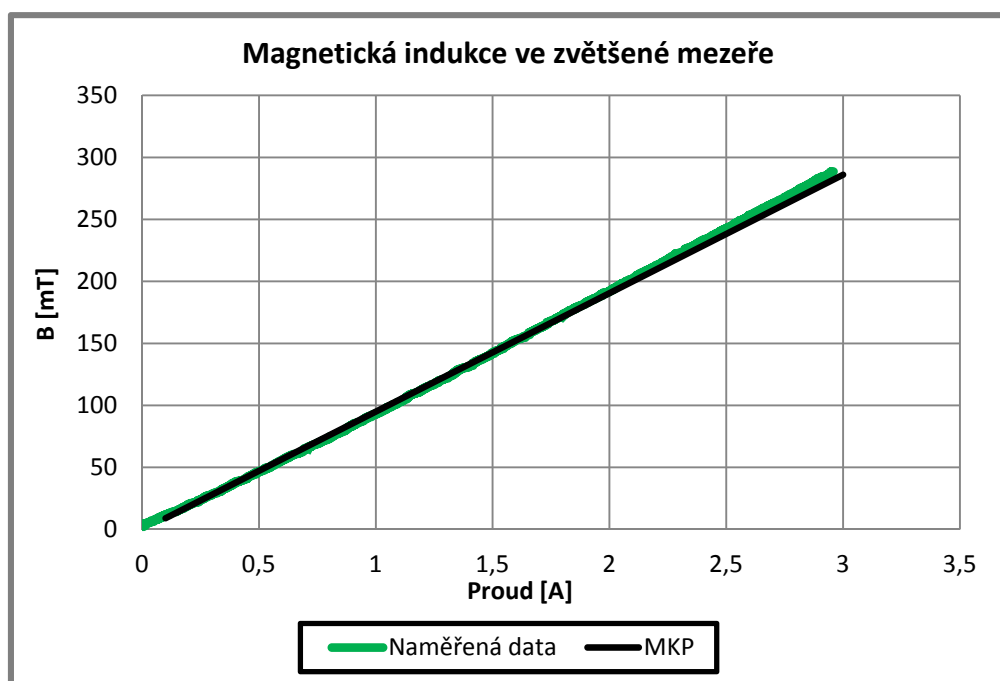


Obr. 66 Ukázka meshe MKP analýzy

Výpočet byl vytvořen pomocí APDL skriptu. Pro analýzu byly použity rovinné trojúhelníkové prvky PLANE 53. Jedná se o 8 uzlový prvek.

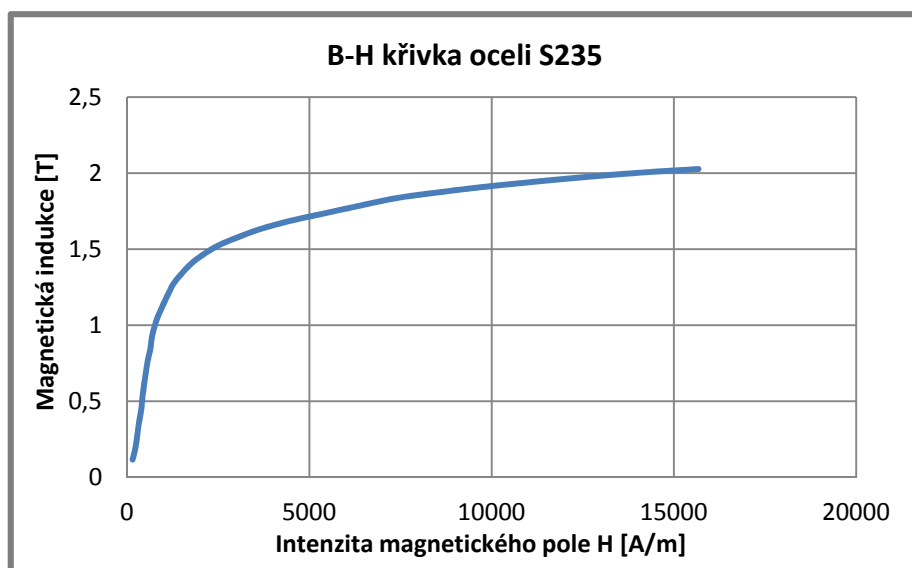


Obr. 67 Ukázka výpočtu z MKP magneto-statické analýzy



Obr. 68 Porovnání velikosti indukce ve zvětšené mezeře mezi MKP analýzou a naměřenými daty

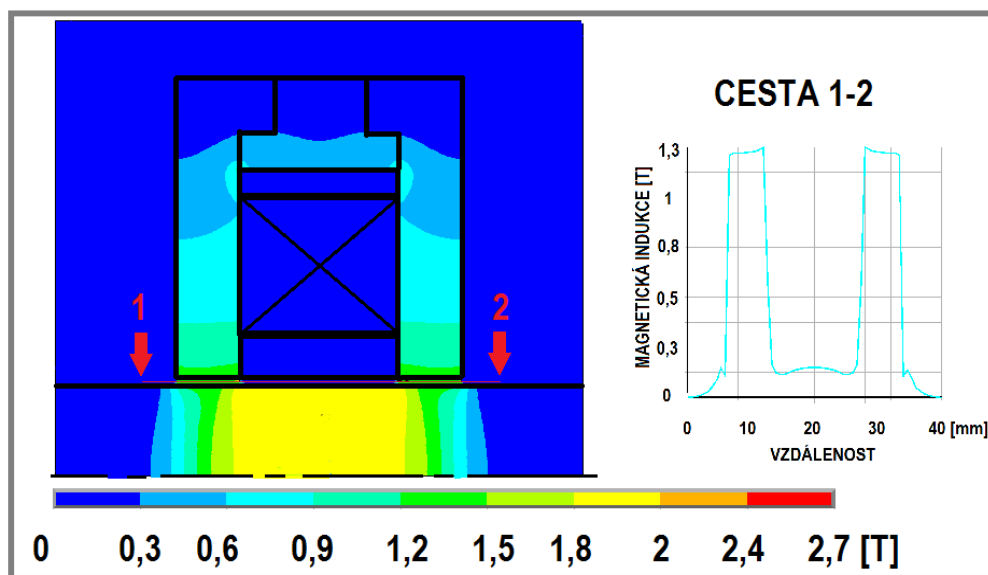
Odchyłka naměřených dat od MKP analýzy byla maximálně do 5 %. Při nastavení nelineárních vlastností oceli S235, která je charakterizována B-H křivkou Obr. 69.



Obr. 69 B-H křivka oceli S235

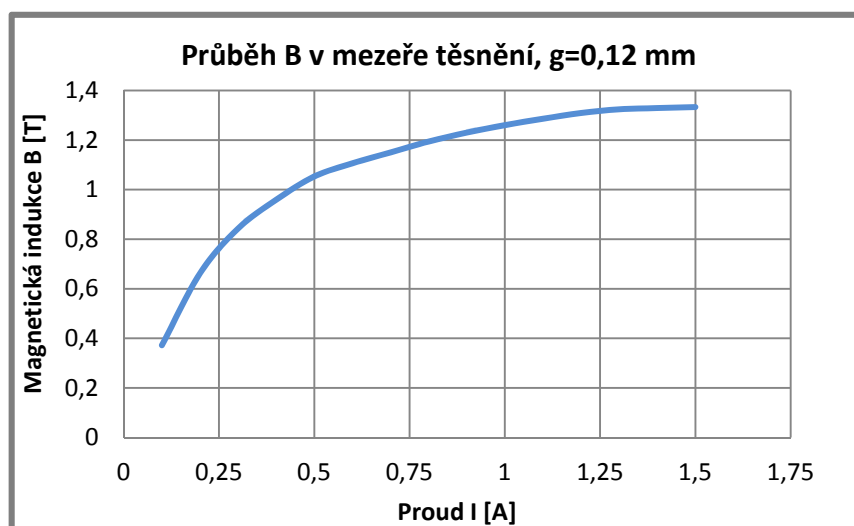
## 5.2 Průběh magnetické indukce ve šterbině těsnění

Velikost tlakové únosnosti těsnění je závislá na velikosti magnetické indukce ve šterbině těsnění. Z tohoto důvodu je potřeba znát maximální velikost magnetické indukce ve šterbině těsnění s MR kapalinou. Velikost magnetické indukce byla počítána v programu ANSYS Classic. Magnetická indukce byla v analýze měřena těsně nad hřídelí mezi body 1 až 2 viz. Obr. 70. Ze sledované cesty byla potom zaznamenána její maximální hodnota.



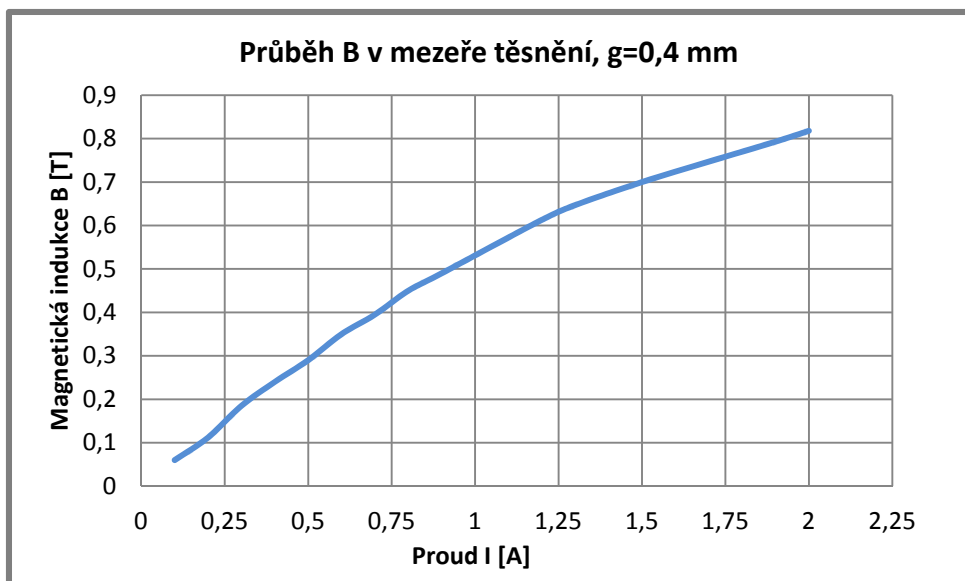
Obr. 70 Ukázka z MKP výpočtu rozložení magnetické indukce magnetického těsnění

Závislost velikosti maximální indukce na velikosti proudu protékající cívkou je znázorněna na Obr. 71.



Obr. 71 Průběh maximální velikosti magnetické indukce var. 1 ve šterbině těsnění při velikosti šterbiny 0,12mm, počtem závitů na cívce 357 a MR kapalinou LORD 132-DG



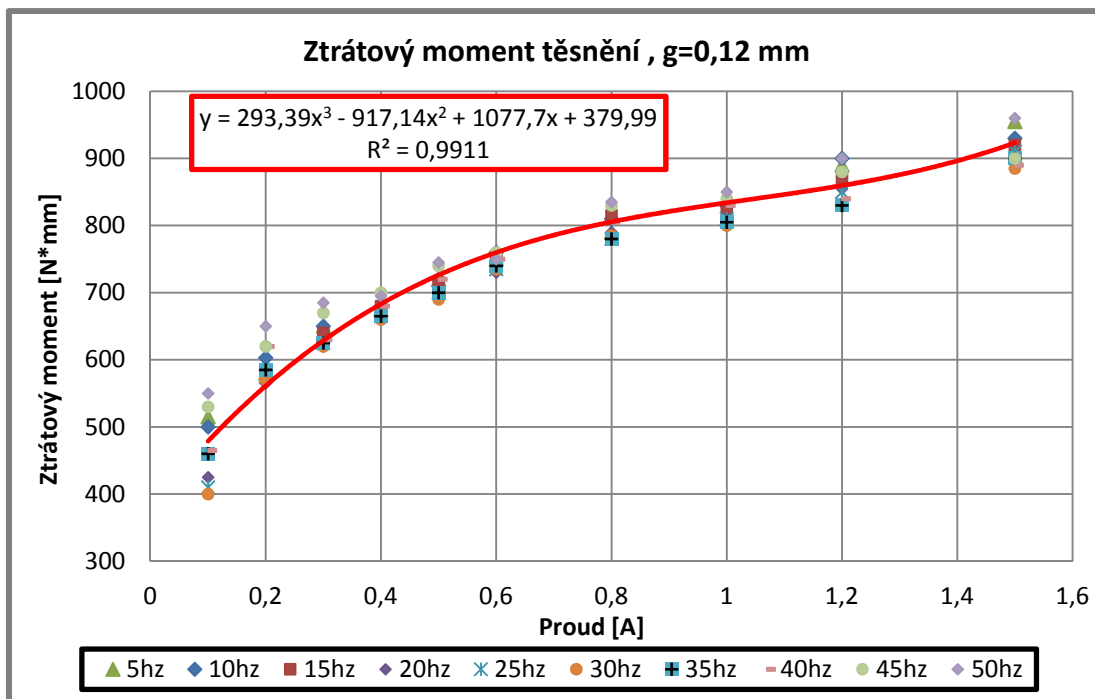


Obr. 72 Průběh maximální velikosti magnetické indukce ve štěrbině těsnění při velikosti štěrbin 0,4 mm, počtem závitů na cívce 100 a MR kapalinou LORD 132-DG

### 5.3 Ztrátový moment magnetického těsnění

5.3

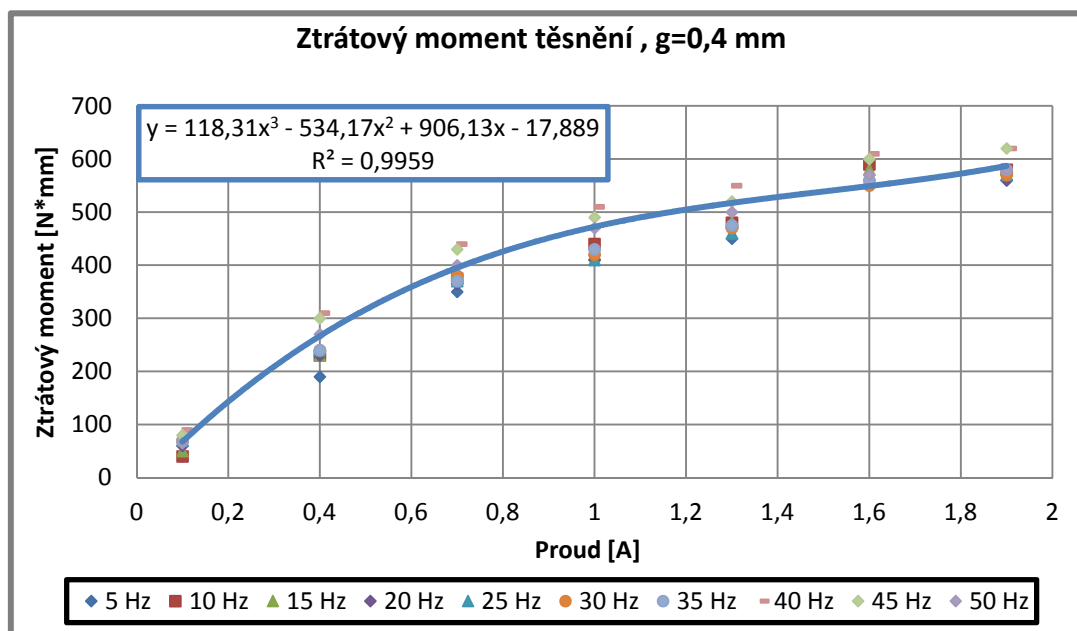
Ztrátový moment těsnění byl měřen při 0 přetlaku. Bylo měřeno magnetické těsnění varianta 1 s MR kapalinou LORD 132-DG. Měřil se ztrátový moment celého testovacího standu, kde výsledný ztrátový moment těsnění se vypočítal jako rozdíl mezi celkovými ztrátami z celého měřicího řetězce a ztrátami ze standu bez magnetického těsnění.



Obr. 73 Ztrátový moment v závislosti na protékajícím proudu pro velikost štěrbin  $g = 0,12$  mm

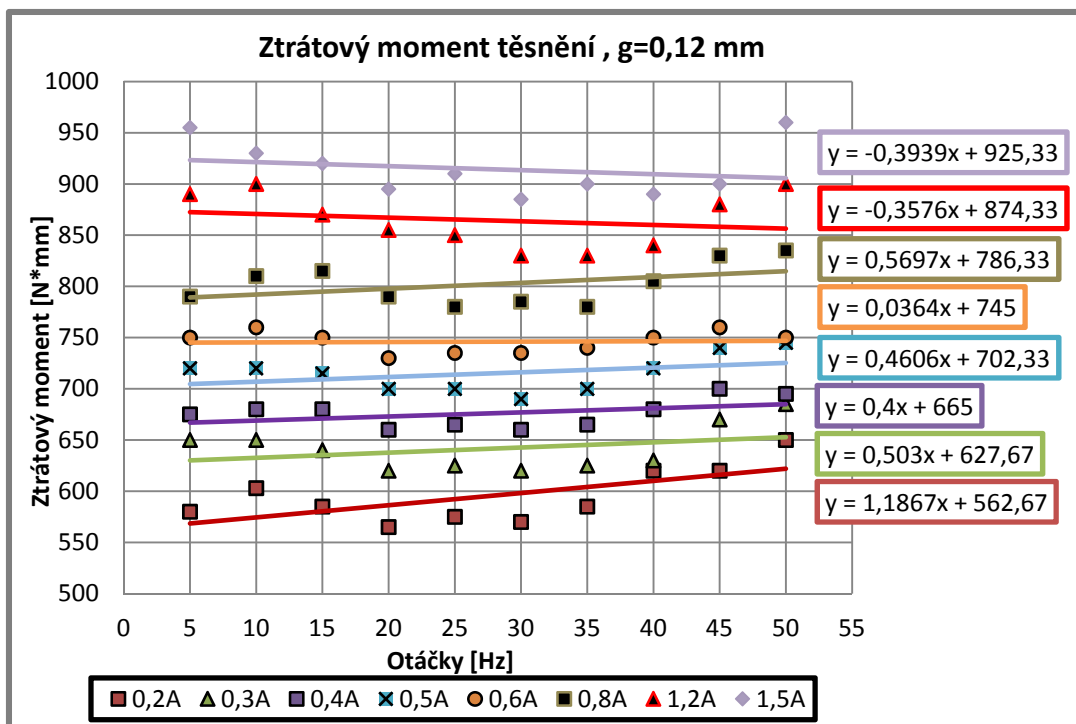
Z výsledků měření Obr. 73 je patrná silná závislost ztrátového momentu na velikosti protékajícího proudu obvodem respektive na velikosti magnetické indukce v mezeře těsnění.

Obdobného průběhu jako měla varianta 1 se dosáhlo také i při měření ztrátového momentu varianty 2. Velikost těsnicí mezery byla  $g = 0,4$  mm. Počet závitů cívky bylo 250.



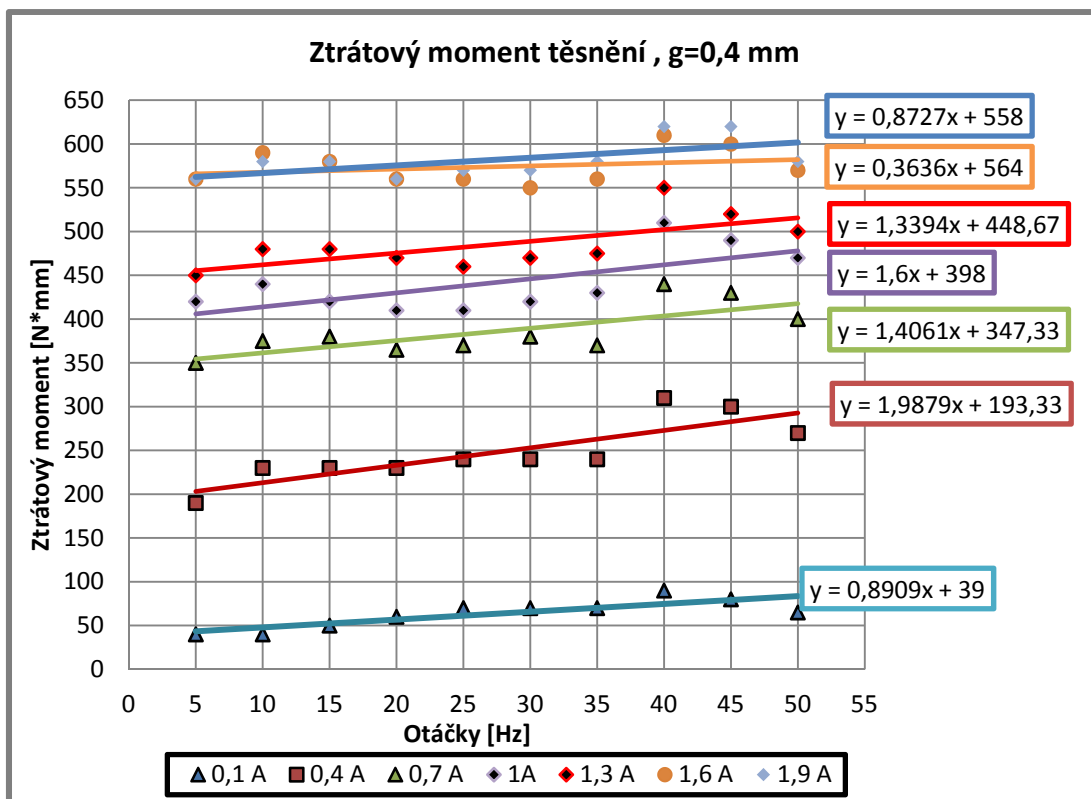
Obr. 74 Ztrátový moment v závislosti na protékajícím proudu pro velikost štěrbiny  $g = 0,4$  mm

Větší těsnicí štěrbina  $g$  měla za následek snížení velikosti magnetické indukce v aktivní zóně. To se projevilo snížením měřeného ztrátového momentu Obr. 74. Vzhledem k tomu, že trojnásobné zvětšení těsnicí mezery a menší počet závitů cívky mělo za následek zmenšení ztrátového momentu a velikosti magnetické indukce přibližně o 30 %. Pro snížení ztrátového momentu je mnohem výhodnější, volit menší těsnicí mezeru  $g$  a slabší zdroj magnetického pole. Tím se dosáhne menšího ztrátového momentu při stejné tlakové únosnosti. Dále to znamená, že vliv velikosti těsnicí štěrbiny  $g$  na velikost ztrátového momentu je zanedbatelný.



Obr. 75 Ztrátový moment v závislosti na otáčkách hřídele pro velikost štěrbin y g = 0,12 mm

Zajímavá je i závislost ztrát těsnění na velikosti otáček. Kde ztráty těsnění se snižovaly přibližně do hodnoty 30Hz a poté se ztráty opět zvyšovaly. Krom tohoto mírného poklesu je vliv otáček zanedbatelný.



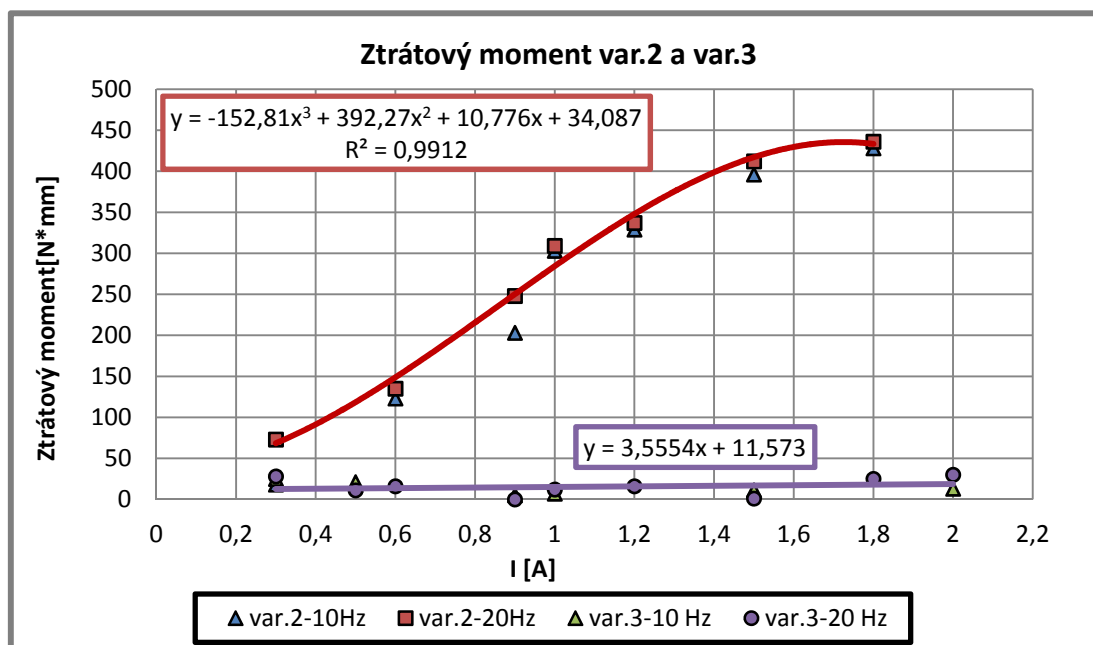
Obr. 76 Ztrátový moment v závislosti na otáčkách hřídele pro velikost štěrbin y g = 0,4 mm

Obdobný sinusový průběh ztrátového momentu v závislosti na otáčkách byl pozorován také u zvětšené těsnicí šterbiny  $g=0,4$  mm. Ačkoliv byla pozorována určitá sinusová závislost ztrátového momentu na otáčkách, tak ve většině případů byla maximální odchylka od lineární závislosti kolem 10 %. To znamená, že vlivem otáček mírně narůstá ztrátový moment těsnění.

Měření ztrát těsnění potvrdilo hlavní nevýhodu standardního MR těsnění a tím je velmi velký ztrátový moment. Tento moment je silně závislý na velikosti magnetické indukce v těsnicí mezeře a slabě závislý na velikosti otáček. Tento velký ztrátový moment snižuje jinak výborné vlastnosti MR těsnění.

### 5.3.1 Ztrátový moment varianty 3

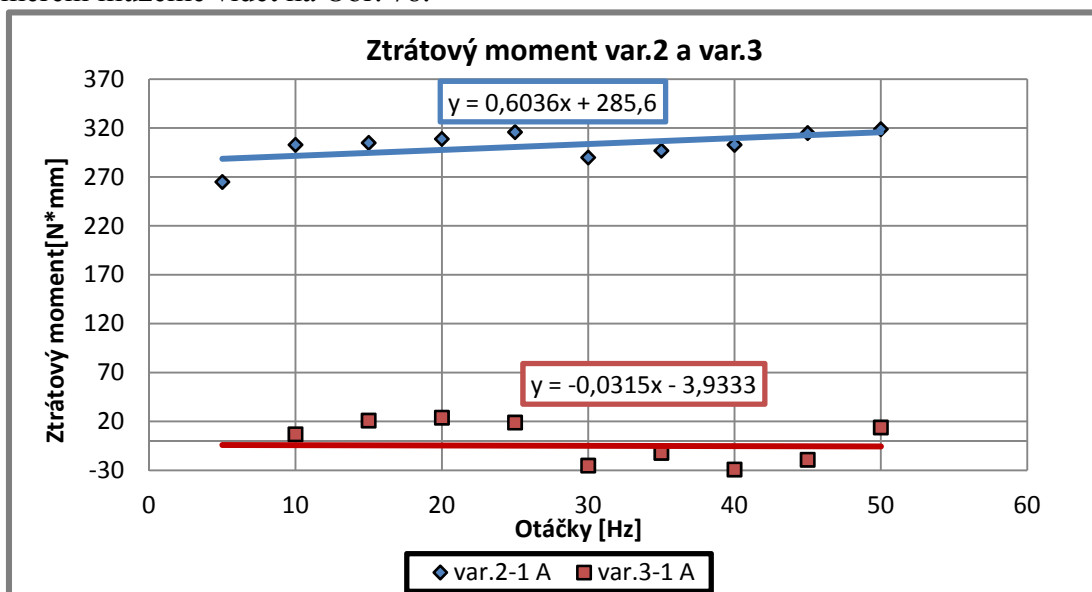
MR těsnění varianty 1 a 2 se vyznačovalo konstantní velikostí magnetické indukce v MR kapalině ve směru kolmém na osu hřídele těsnění. Experimentální Varianta 3 se ovšem vyznačuje prudkým nárůstem magnetické indukce ve střední rovině těsnění Obr. 45. Navíc se velikost magnetické indukce v MR kapalině výrazně mění i ve směru kolmém na osu hřídele těsnění. To značně znemožňuje porovnání optimalizované varianty s původní. Aby tedy bylo možné porovnávat ztrátový moment optimalizované varianty 3 se standardní variantou 2 měly obě těsnění jednotné vnější rozměry a jednotný počet závitů na cívce o počtu 100 závitů. Dále byla použita stejná magnetoreologická kapalina LORD 132-DG. Ztrátový moment pro porovnání byl vypočítán jako součin měřené síly tenzometrickým siloměrem a velikosti páky 24,75 mm. Výsledky z tohoto měření můžeme vidět na Obr. 77.



Obr. 77 Porovnání ztrátového momentu varianty 2 a optimalizované varianty 3 v závislosti na velikosti proudu pro velikost otáček 10, 20 Hz a počtu závitů na cívce 100

Varianta 3 MR těsnění byla navržena tak, aby řešila problém s vysokými ztrátovými momenty. Výsledky z měření ztrátového momentu jednoznačně dokazují, že optimalizovaná varianta má ztrátový moment zanedbatelně malý.

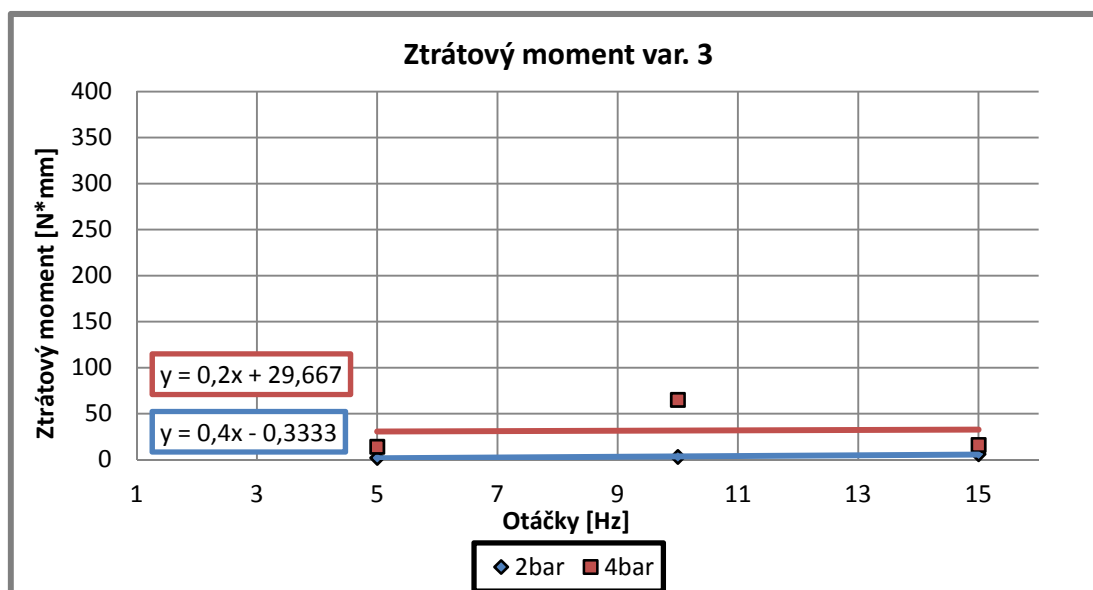
Dále byl měřen ztrátový moment v závislosti na velikosti otáček. Výsledky z tohoto měření můžeme vidět na Obr. 78.



**Obr. 78** Porovnání ztrátového momentu varianty 2 a optimalizované varianty 3 v závislosti na velikosti otáček, při proudu procházejícím cívku 1 A

Výsledná velikost ztrátového momentu varianty 3 v oblastech od 30 až 45 Hz se zde vyskytuje v záporných hodnotách. To ovšem není možné a mohlo to být způsobeno chybou měření nebo tím, že se snížily třecí ztráty mezi hřídelí a hřídelovým těsněním vydřením drážky v hřídeli.

U varianty 3 byl také testován ztrátový moment, když na těsnění působil přetlak. Vzhledem k tomu, že ztrátový moment od hřídelového těsnění se zvyšuje se zvyšujícím se přetlakem. Bylo potřeba znovu proměřit ztrátový moment testovacího standu při různých otáčkách a při vystavení různého přetlaku. Tato data byla poté odečtena od naměřeného ztrátového momentu s magnetickým těsněním. Výsledky z tohoto měření lze vidět na Obr. 79. Tato optimalizovaná varianta měla 100 závitů cívky a procházel jí proud o velikosti 2 A.



Obr. 79 Ztrátový moment těsnění varianty 3 při různé velikosti vystaveného přetlaku

Protože bylo zjištěno, že tlaková únosnost těsnění se rapidně snižuje s otáčkami. Byly proto ztráty těsnění měřeny pouze do velikosti otáček 15 Hz a maximální vystavený přetlak na těsnění byl 4 bary. Z výsledků testů vyplývá, že závislost ztrátového momentu na velikosti přetlaku na těsnění je zanedbatelná.

## 5.4 Statická tlaková únosnost těsnění

MR těsnění bylo testováno na tlakovou únosnost při ventilovém módu respektive při nulových otáčkách hřídele. Při měření tlakové únosnosti byla použita MR kapalina LORD 132-DG. Výsledky tlakové únosnosti varianty 2 by poté měly odpovídat vztahu tlakové únosnosti magnetoreologického ventilu [19].

$$\Delta p = \frac{c\tau_{y(H)}L}{g} \quad (15)$$

kde  $\Delta p$  je tlakový rozdíl před a za ventilem [Pa],  $c$  je konstanta rychlosti proudění,  $\tau_{y(H)}$  je mez toku  $\tau_y$  [Pa],  $L$  je šířka břitů [m] a  $g$  je velikost mezery na poloměru [m].

Vzhledem k tomu, že břity magnetického těsnění jsou oproti ventilu, pro které byl tento vztah odvozen, velmi tenké. Tak bylo nutné tento vztah matematicky upravit.

$$\Delta p = \frac{c\tau_{y(H)}L}{g} \Rightarrow dP = \frac{c\tau_{y(H)}dl}{G} \Rightarrow P = \frac{c}{G} \int_0^l \tau_y(H)dl \quad (16)$$

kde  $\Delta P$  je tlaková únosnost v [Pa],  $c$  je konstanta rychlosti proudění,  $\tau_{y(H)}$  je mez kluzu  $\tau_y$  [Pa],  $l$  je délka výskytu mag. kapaliny [m] a  $G$  je délka zřetězených magnetických částic v aktivní zóně [m].

Konstanta  $c$  se podle autora Sung Hoon Ha vypočte dle vztahu [19]:

$$c \cong 2,07 + \frac{1}{1+0,4F} \quad (17)$$

Kde parametr  $F$ .

$$F = \frac{g^2 \tau_y \pi d_{st}}{12 A_p v_0 \mu} \quad (18)$$

kde  $\tau_{y(H)}$  je mez kluzu v [Pa],  $g$  je velikost mezery na poloměru [m],  $d_{st}$  je střední průměr mezery [m],  $A_p$  je obsah mezery těsnění [m<sup>2</sup>],  $v_0$  je rychlost protékající MR kapaliny šterbinou [ms<sup>-1</sup>] a  $\mu$  je Poissonova konstanta [-], .

Vzhledem k tomu, že rychlost proudění MR kapaliny v okamžiku průsaku těsnění je  $v_0=0$  ms<sup>-1</sup> pak při dosazení do rov. (18) platí:

$$F = \lim_{v_0 \rightarrow 0} \left( \frac{g^2 \tau_y \pi d_{st}}{12 A_p v_0 \mu} \right) = \infty \quad (19)$$

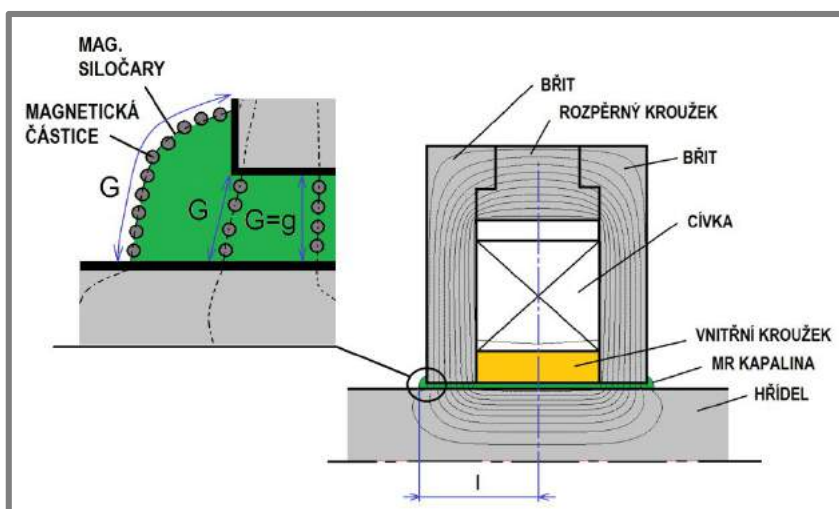
Odtud je pak  $c$  konstanta rychlosti proudění dosazením rov. (19) do rov. (17)

$$c \cong \lim_{F \rightarrow \infty} \left( 2,07 + \frac{1}{1+0,4F} \right) \cong 2,07 \quad (20)$$

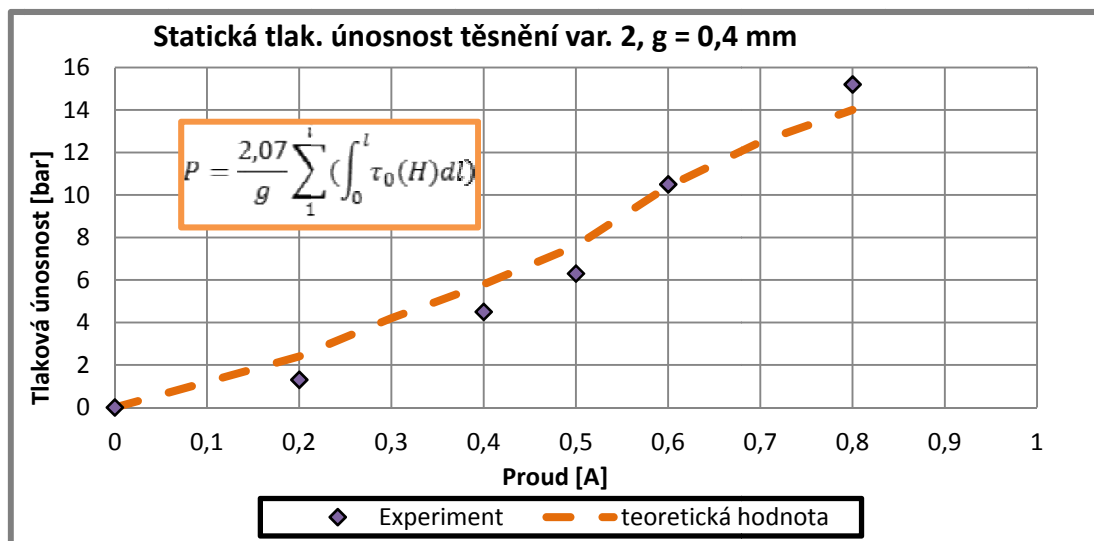
Dosazením konstanty  $c$  do rov. (16) je poté výsledný vztah tlakové únosnosti ve statickém režimu:

$$P = \frac{2,07}{G} \sum_1^i \left( \int_0^l \tau_{yi}(H) dl \right) \quad (21)$$

kde  $\Delta P$  je tlaková únosnost těsnění při nulových otáčkách hřídele v [Pa],  $i$  je počet břitů magnetického těsnění  $l$  je délka výskytu mag. indukce [m] a  $G$  je délka zřetězených magnetických částic v aktivní zóně [m] Obr. 80.

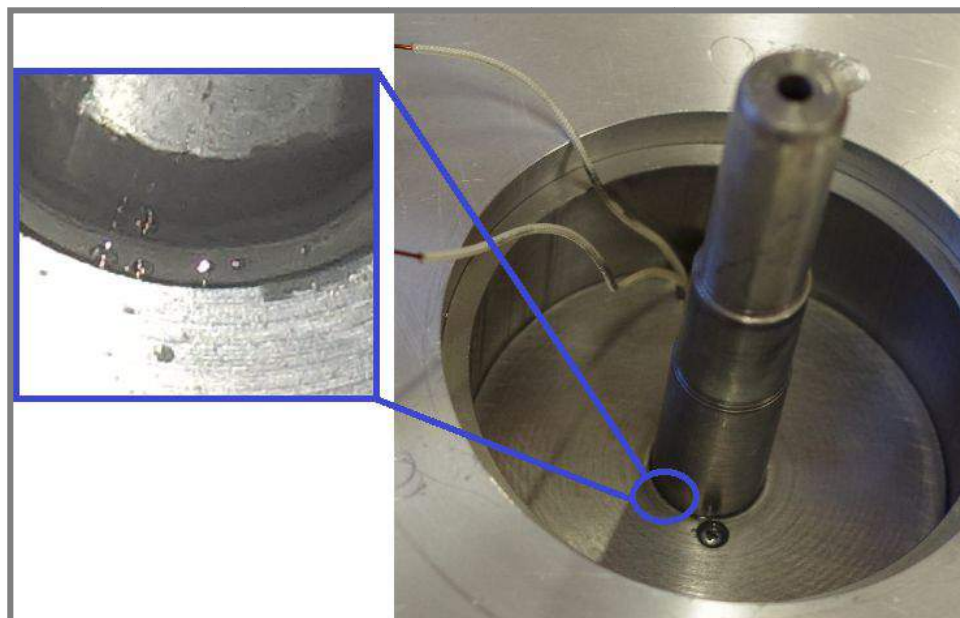


Obr. 80 Popis parametrů MR těsnění pro výpočet tlakové únosnosti



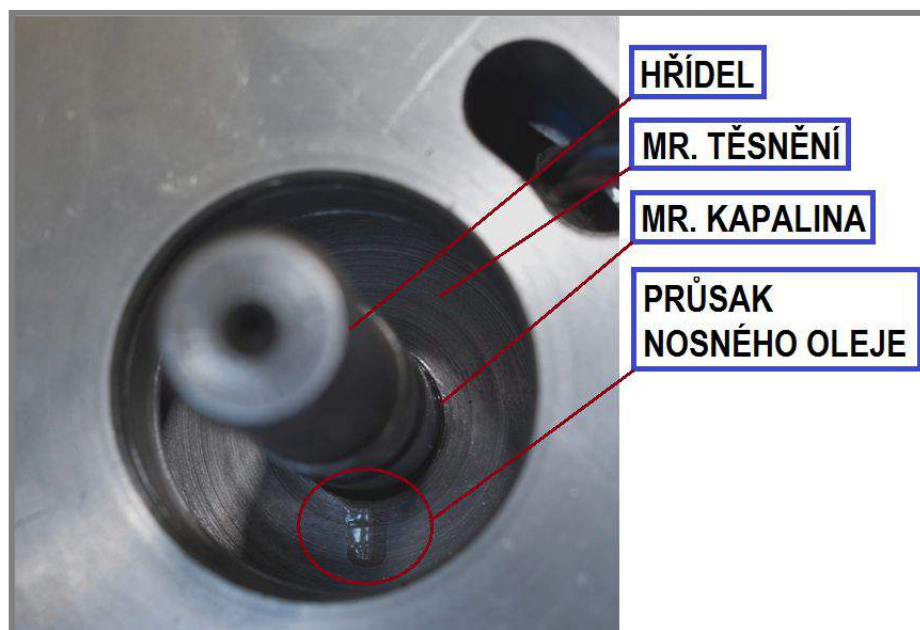
Obr. 81 Statická únosnost těsnění var. 2 při velikosti štěrbin 0,4 mm a počtu závitů na cívce 100

Tlaková únosnost těsnění byla výborná. Velmi snadno bylo dosaženo tlakových špiček až 15 bar a tlaková únosnost se dá velmi přesně předpovědět použitím rovnice (21). Při testování MR těsnění bylo zjištěno, že dochází k průsaku nosného oleje z MR kapaliny Obr. 83, ale také dochází k tvorbě bublin uvnitř MR kapaliny Obr. 82. Pokud nedojde k odstranění těchto bublin, mohou se projevit i více než 50% snížením tlakové únosnosti. Při testování tlakové únosnosti docházelo po natlakování sestavy k prosakování nosného oleje. Průsak nosného oleje byl viditelný přibližně po 4 minutách od natlakování sestavy ve statickém režimu. K průsaku oleje začne docházet, jakmile je na těsnění vyvinutý přetlak. Prosakování oleje se děje do té doby, dokud nebude rozdíl tlaků roven 0.



Obr. 82 Vznik bublin v MR kapalině

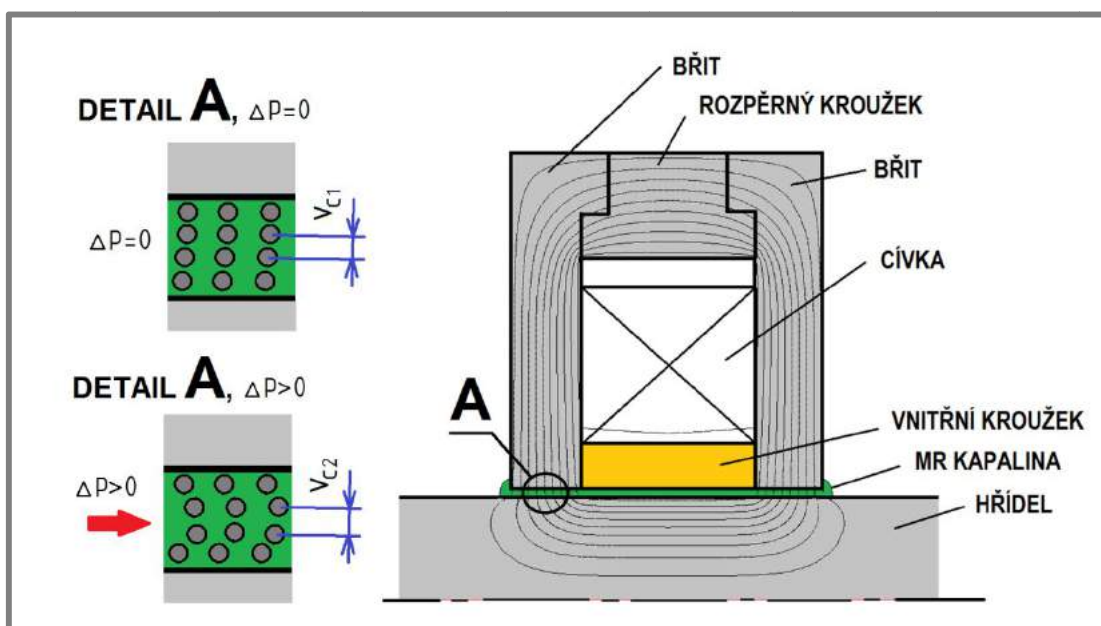




Obr. 83 Průsak nosného oleje při přetlaku těsnění

Při rotaci hřídele je prosakování nosného oleje mnohem intenzivnější. Mezi hlavní nevýhodu MR těsnění se standardně uvádí velký ztrátový moment. Při testování bylo zjištěno, že mnohem větší problém způsobuje průsak nosného oleje, který by poté mohl kontaminovat těsnicí médium.

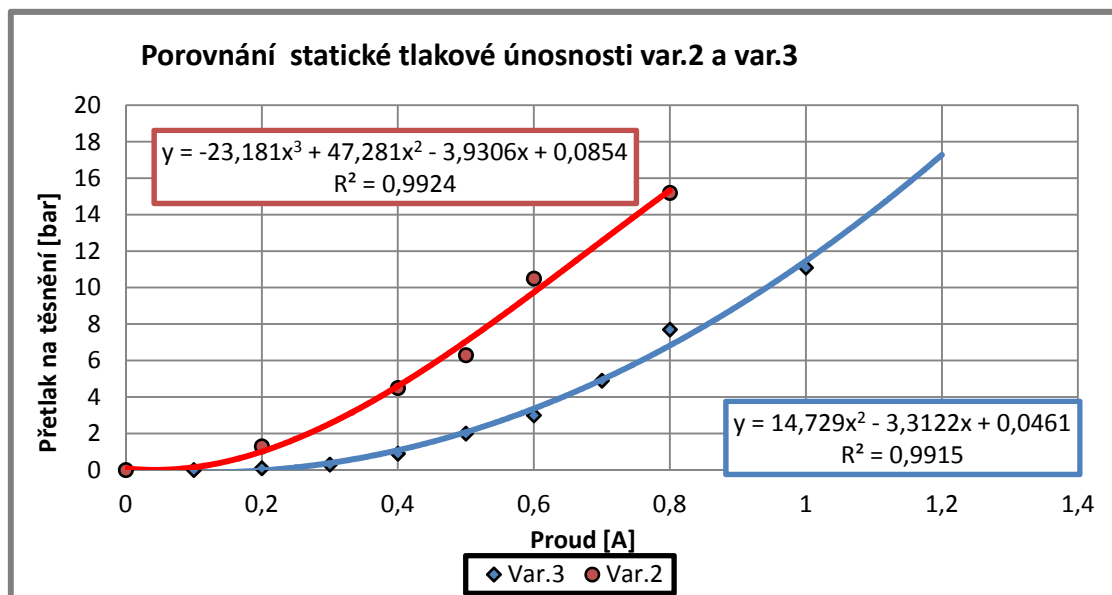
Jakmile je magnetické těsnění vystaveno přetlaku. Dojde k přetvoření magnetické kapaliny (natažení řetězců magnetických částic). Tím se od sebe zvýší vzdálenost magnetických částic ( $v_{c1} < v_{c2}$ ) a nosný olej pak může snadno z MR kapaliny prosakovat Obr. 84.



Obr. 84 Přetvoření magnetických částic při přetlaku v aktivní zóně

### 5.4.1 Tlaková únosnost optimalizované varianty 3

Aby bylo možné porovnávat provozní parametry původní varianty 2 s nově optimalizovanou variantou 3. Měly obě varianty stejné zástavbové rozměry a stejný počet 100 závitů na cívce.



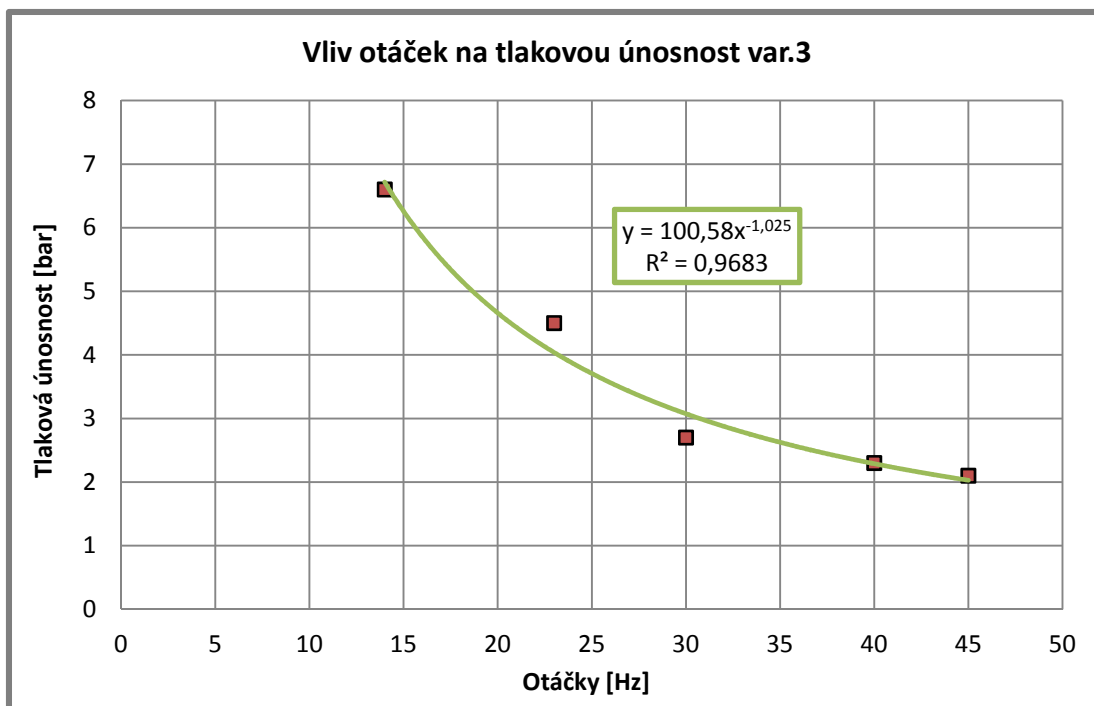
Obr. 85 Porovnání statické tlakové únosnosti var.2 a var.3

Varianta 3 neměla do hodnoty proudu procházejícího cívkou 0,2 A prakticky žádnou tlakovou únosnost. To znamená, že velikost magnetické indukce nebyla dostatečná, aby se MR kapalina přitiskla k hřídeli. Při vyšších hodnotách se tlaková únosnost těsnění zvyšovala a její průběh je přibližně kvadratický. Výsledky ukazují, že statická tlaková únosnost varianty 3 je sice menší než u varianty 2, ale nebyl u ní pozorován průsak nosného oleje z MR kapaliny. Z toho vyplývá, že nároky na MR kapalinu by byli v praxi mnohem nižší než u variant 1 a 2.

## 5.5 Dynamická tlaková únosnost

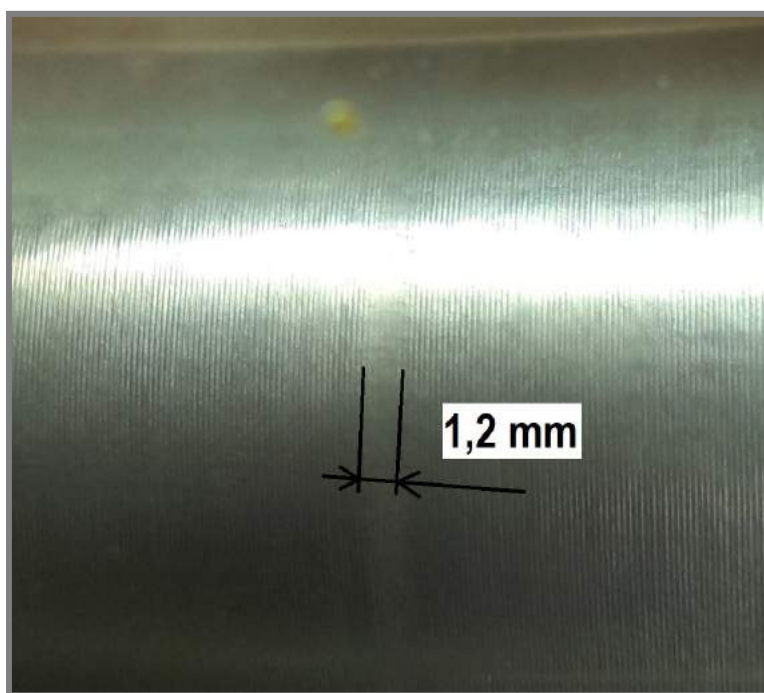
Při testování tlakové únosnosti při otáčkách hřídele varianty 2 bylo zjištěno, že vlivem otáčení hřídele dochází k velmi rychlému prosakování nosného oleje z magnetické kapaliny. K prosakování nosného oleje dojde bezprostředně poté, co se těsnění vystaví přetlaku. To má za následek vytvoření časově omezenou tlakovou únosnost tohoto typu těsnění. Jakmile prosákne dostatečné množství nosného oleje z MR kapaliny dojde k průsaku těsnění.

U varianty 3 prosakování nosného oleje nebylo pozorováno a to ani při rotaci hřídele. Je to zřejmě způsobeno tím, že při vystavení přetlaku nedojde ke zvětšení vzdálenosti mezi magnetickými částicemi. Průsaku nosného oleje je také zabráněno tím, že magnetické částice jsou zde zřetženy ve stejném směru, jakým se snaží prosakovat nosný olej. Dále pokud tento typ těsnění vystavíme přetlaku, tak dojde naopak ke zmenšení vzdálenosti mezi magnetickými částicemi. Výsledky z testování dynamické tlakové únosnosti lze vidět na Obr. 86.



Obr. 86 Dynamická tlaková únosnost varianty 3

Varianta 3 byla navrhnutá tak, aby byla necitlivá vůči velikosti otáček. Z měření dynamické tlakové únosnosti byla ovšem zjištěna silná závislost na velikosti otáček hřídele, kde tlaková únosnost silně klesá se zvyšujícími se otáčkami. Při rotaci hřídele ovšem nedochází ke klouzání magnetických částic po hřídeli, ale částice jsou unášeny nerovnostmi povrchu hřídele. Díky tomu jsou magnetické částice, které jsou ve styku s hřídelí, nuceny rotovat. Tím dochází k výraznému snížení přitlačné síly kapaliny na hřídel a tím pádem i snížení tlakové únosnosti. To znamená, že dynamická tlaková únosnost, by pak měla být silně spjatá s drsností povrchu. Aby bylo možné ověřit tuto hypotézu, byl proveden experiment, kde se na hřídel nalisoval tenký kroužek s vyšší drsností povrchu, než byl původně na hřídeli. V této konfiguraci docházelo k průsaku těsnění při mnohem nižších otáčkách. Při přetlaku 2 bar došlo k průsaku těsnění již při velikosti otáček 5 Hz. Při testování bylo rovněž pozorováno, že dochází vlivem tření MR kapaliny o hřídel k vydírání hřídele Obr. 87.



**Obr. 87** Nemagnetická hřídel po testech s MR kapalinou

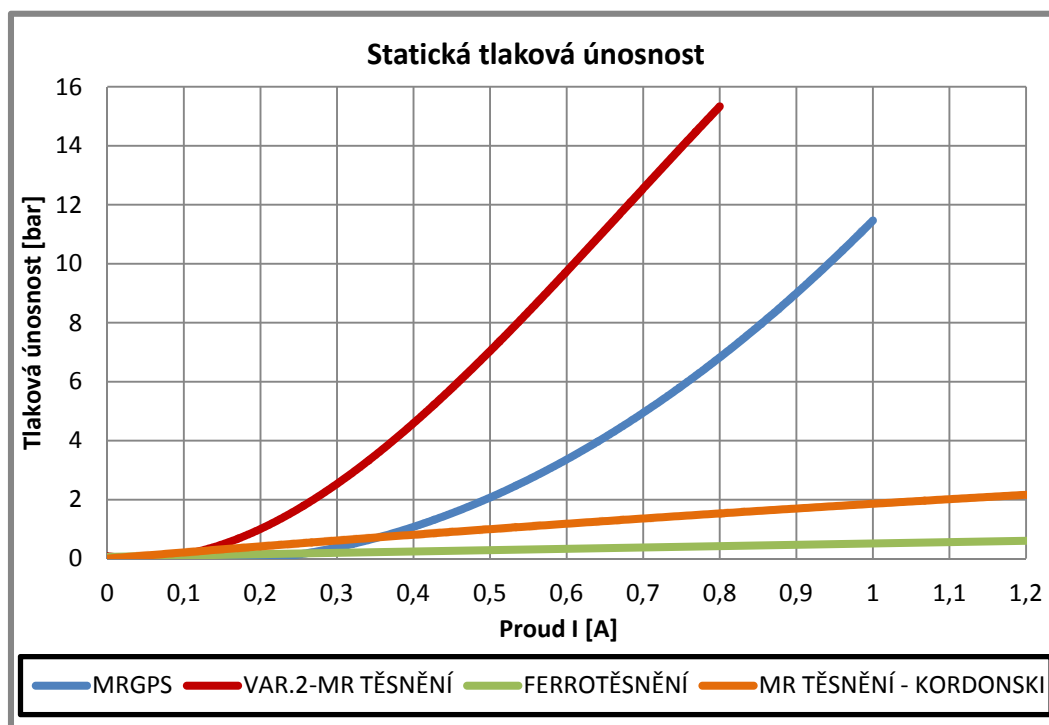
Tyto výsledky výrazně mění požadavky na povrch hřídele. Pro praktické použití by povrch hřídele měl být pokud možno co nejtvrdší, aby bylo zabráněno vydírání nežádoucích drážek do hřídele (například tvrdé eloxování u hřídele vyrobené ze slitiny hliníku). Dále je nutné mít velmi hladký povrch (přibližně drsnost Ra 0,4). Kromě tohoto požadavku je také velmi důležitý směr nerovností, který by měl být rovnoběžný se směrem rotace hřídele. Velmi důležitá je také hodnota házení hřídele, která by také měla být co nejmenší.

## 6 DISKUZE

## 6

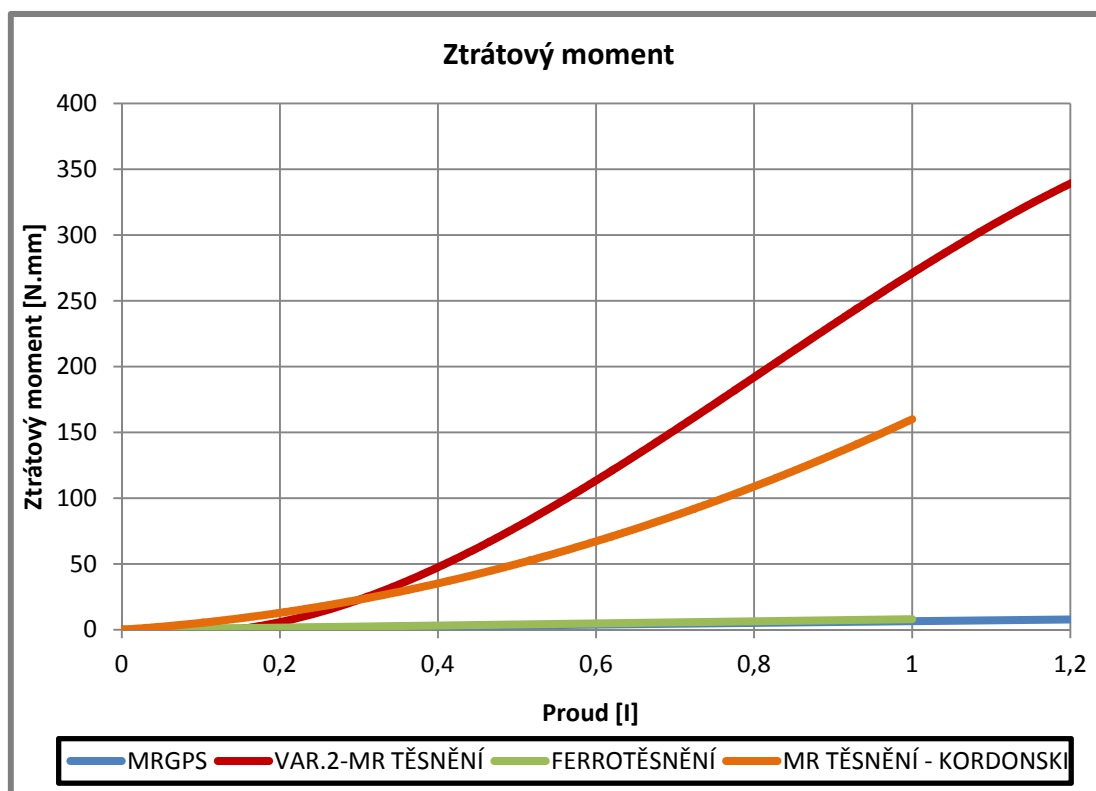
MR těsnění ukázalo během testování svůj obrovský potenciál a vyznačuje se obrovskou statickou tlakovou únosností a velkým brzdícím momentem při rotaci hřídele. Při testování bylo pozorováno, že dochází k separaci nosného oleje z MR kapaliny. Toto prosakování je mnohonásobně intenzivnější při rotaci hřídele, kde dochází k trhání částic magnetických řetězců. Tento jev se projevil vytvořením časově omezené tlakové únosnosti. Aby byly tyto problémy vyřešeny (průsak oleje a velký ztrátový moment), byl proto navrhnut zcela nový magnetický obvod, který byl identifikován jako Magneto-Rheology-Gradient-Pinch-Seal (Magnetoreologické gradientní svěrné těsnění). Tato nová konstrukce efektivně řeší problémy standardního MR těsnění a vyznačuje se velmi nízkým ztrátovým momentem a velkou tlakovou únosností.

Následující grafy Obr. 88 až Obr. 90 porovnávají provozní parametry testovaného MR těsnění varianty 2, nově navrženého MRGPS, Ferrotěsnění [16] a MR těsnění publikované autorem Kordonski[16].



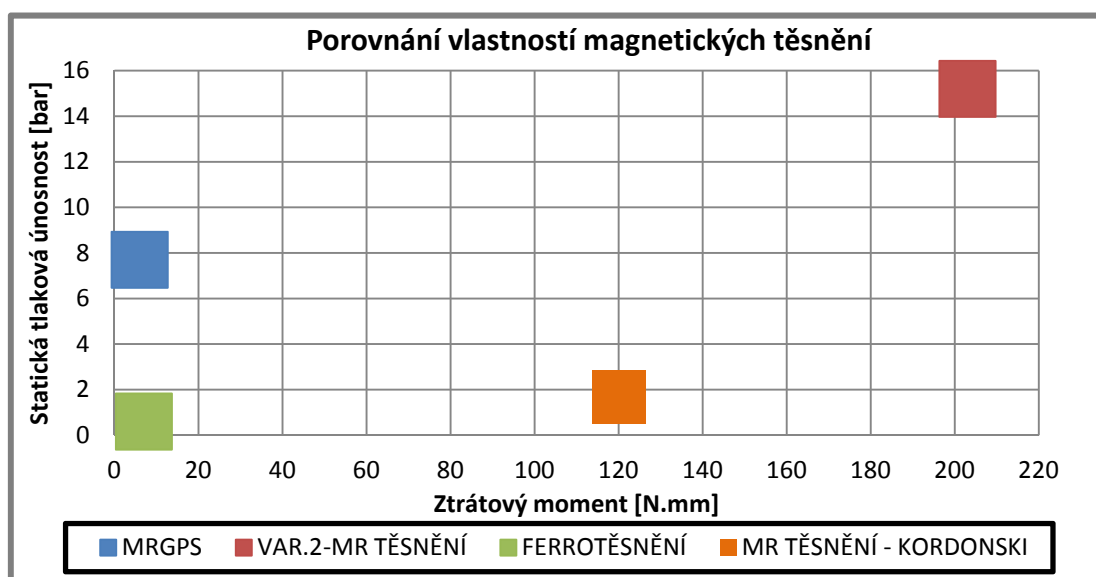
Obr. 88 Porovnání statické tlakové únosnosti magnetických těsnění

Z výsledků vyplývá, že statická tlaková únosnost var.2 je nejlepší. Je to ovšem za předpokladu, že u této koncepce nedochází k průsaku nosného oleje. Tlaková únosnost nového MRGPS je sice přibližně poloviční než u MR těsnění var. 2. Nebylo u ní ovšem pozorováno prosakování nosného oleje. Při aplikaci MR kapaliny do aktivní zóny se sice část nosného oleje vlivem magnetického pole oddělila, ovšem po odsátí již prosakování nebylo pozorováno a to ani při rotaci hřídele. To znamená, že pro MRGPS by byla vhodnější MR kapalina s vyšším obsahem magnetických částic než obsahuje testovaná kapalina LORD 132-DG.



Obr. 89 Porovnání ztrátového momentu magnetických těsnění

Výsledky na Obr. 89 dokazují, že velikost ztrátového momentu nového MRGPS odpovídá počáteční hypotéze a to, že velikost ztrátového momentu je rovna pouze třením částic o hřídel (kapalinové tření). Tato velikost ztrátového momentu dosahuje přibližně stejné hodnoty jako standardně používané Ferrotěsnění, ovšem s mnohem větší tlakovou únosností.



Obr. 90 Porovnání vlastností magnetických těsnění

## 6.1 Vliv magnetického pole

6.1

**Varianta 1 a 2** – Se zvyšujícím se magnetickým polem v aktivní zóně se zvyšuje tlaková únosnost a velikost ztrátového momentu

**Varianta 3 (MRGPS)** – Se zvyšujícím se magnetickým polem v aktivní zóně roste tlaková únosnost těsnění. Se zvyšujícím se magnetickým polem v aktivní zóně se velikost ztrátového momentu nemění.

## 6.2 Vliv otáček

6.2

**Varianta 1 a 2** - Vlivem otáček dojde k trhání řetězců magnetických částic a tím se velmi zrychlí prosakování nosného oleje z MR kapaliny. To se projeví vytvořením časově omezené tlakové únosnosti. Prosakování oleje trvá do té doby, dokud není přetlak na těsnění roven 0 nebo dokud množství nosného oleje v MR kapalině neklesne pod kritickou úroveň. Poté dojde k průsaku celého těsnění. S narůstajícími otáčkami dochází k mírnému nárůstu ztrát. Tento nárůst je ovšem zanedbatelně malý.

**Varianta 3 (MRGPS)** - Vlivem otáček se výrazně snižuje tlaková únosnost tohoto těsnění. Magnetické částice zapadají do nerovností povrchu hřídele a při rotaci hřídele jsou tyto částice unášeny. Unášené částice poté roztáčí zbytek MR kapaliny a tím se výrazně snižuje přitlačná síla, která tlačí MR kapalinu k hřídeli. U této varianty jsou magnetické částice vlivem přetlaku a magnetickým polem tlačeny blíže k sobě. Proto tato varianta efektivně řeší prosakování nosného oleje a při testování průsak nebyl pozorován. Vliv otáček na velikost ztrátového momentu je zanedbatelný. Porovnání výhod a nevýhod nového MRGPS se standardním MR těsněním lze vidět v Tab. 7

Název	MRGPS	Var.1 a 2-MR těsnění
Ztrátový moment	+	-
Statická tlaková únosnost	-	+
Dynamická tlaková únosnost	+	-
Schopnost těsnit lineární pohyb	+	-
Opotřebení	-	+
Aplikace MR kapaliny do aktivní zóny	+	-
Imunita proti zkratu mag. obvodu	+	-
Odolnost proti průsaku nosného oleje	+	-
Požadavky kladené na MR kapalinu	+	-

Tab. 7 Porovnání výhod a nevýhod nového MRGPS se standardním MR těsněním

## 6.3 Výstupy práce

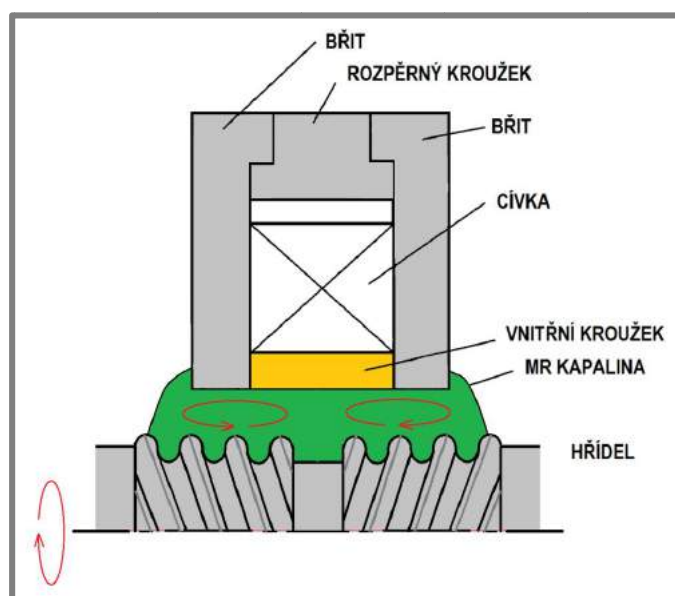
6.3

G-funkční vzorek magnetického těsnění (134891)  
patentová přihláška

## 6.4 Návrh možných budoucích konstrukčních úprav experimentálního zařízení a metodiky testování

### 6.4.1 Magnetické těsnění a MR kapalina

V současnosti se u standardního MR těsnění řeší prosakování nosného oleje. Nabízí se tedy několik možností, jak průsak oleje z MR kapaliny u varianty 1 a 2 řešit. První možnost je přidání nanočástic do MR kapaliny. Nanočástice by tak měli efektivně ucpávat mezery mezi mikročásticemi a zamezit tak prosakování nosného oleje viz. patent [9]. Jako další možnost se nabízí využít jiný základový olej, který má velmi dlouhé molekulární řetězce, jako je například kyselina olejová nebo stearová. Zde by průsaku bylo zabráněno tím, že délka molekulárních řetězců nosného oleje, by ucpávala mezery mezi magnetickými částicemi. Další možností je změna konstrukce magnetického obvodu. Kromě prezentované varianty 3 (MRGPS), by pravděpodobně pro aplikace, kde jsou vyžadovány velké otáčky hřídele bez reverzace, fungovala i varianta, kde by byly na hřídeli vyrobeny spirálovité zuby. Tyto zuby by pak při rotaci hřídele vytvářely v aktivní zóně víry, které by promíchávaly MR kapalinu. Vzhledem k tomu, že by zde bylo velké nebezpečí vzniku bublin uvnitř MR kapaliny. Bylo by pravděpodobně nejvhodnější, kdyby zuby měly tvar oblého závitů. Je ovšem nutné podotknout, že všechny způsoby řešení by způsobily nárůst ztrátového momentu.



Obr. 91 Schéma magnetického obvodu se spirálovými zuby

U varianty MRGPS docházelo k vydírání drážky do hřídele. Drážka měla hladší povrch, než byl původní. To se projevilo mírným zvýšením dynamické tlakové únosnosti. Vzhledem k tomu, že k iniciaci průsaku dojde v blízkosti povrchu hřídele. Lze proto předpokládat, že povrch s dobrou drsností (cca  $Ra\ 0,4$ ) a velkou vlnitostí se směrem nerovností kolmým na osu hřídele, by ještě navýšil tlakovou únosnost.

U magnetického těsnění bylo dále zjištěno, že ideální počet závitů cívky pro var.2 i var. 3 je přibližně kolem 100 při průměru drátu 0,5 mm. Těsnění bylo původně navrženo na 350 závitů. To dává možnost ke zmenšení zástavbového prostoru

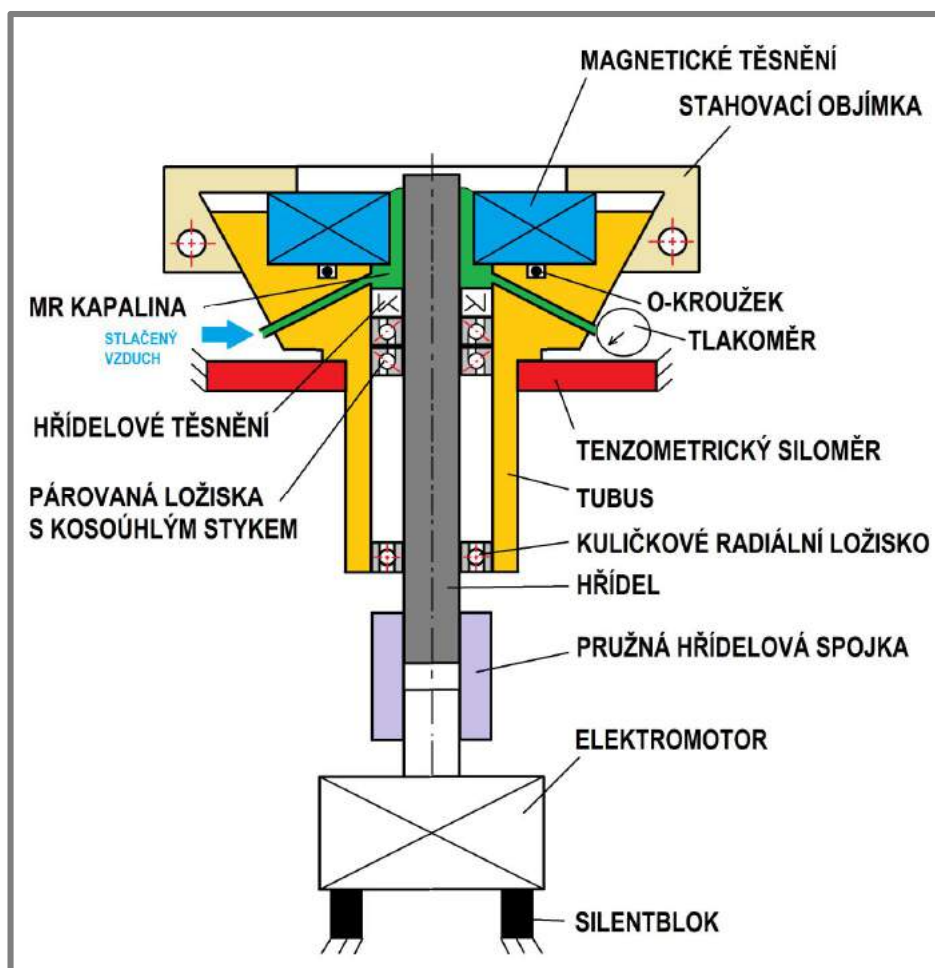


těsnění. Zejména vnější průměr by se mohl zmenšit z 86 mm na 68 mm a snížit tím výrobní náklady.

#### 6.4.2 Experimentální zařízení

6.4.2

Při testování magnetického těsnění byly zjištěny nové poznatky a nedostatky, které by vyřešila konstrukce nového experimentálního zařízení. Největší problém u původního zařízení byla příruba s kuličkovým ložiskem. To velmi ztěžovalo pozorování MR kapaliny uvnitř aktivní zóny. Při průsaku těsnění MR kapalina kontaminovala kuličkové ložisko, které poté změnilo svůj ztrátový moment a muselo se proto znovu změřit velikost ztrát testovacího standu. Z tohoto důvodu je uložení hřídele navrženo letmo. Pro snazší aplikaci MR kapaliny do aktivní zóny je celé zařízení umístěno do vertikální polohy. Vzhledem k tomu, že při testování těsnění je zapotřebí častá montáž a demontáž MR těsnění ze standu. Byla proto navržena rychloupínací stahovací objímka, která těsnění zajistí v axiálním i radiálním směru. Testovací stand by byl zavěšen na dvou popřípadě třech tenzometrických siloměrech, které by měřily velikost ztrátového momentu při rotaci hřídele. Hřídel by byla poháněna elektromotorem (minimální výkon motoru by měl být 0,5 kW pro dosažení  $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Otáčky elektromotoru by byly řízeny frekvenčním měničem. Aby bylo dosaženo pokud možno, co nejpřesnější uložení hřídele, je z jedné strany hřídel uložena v párových kuličkových ložiskách s kosoúhlým stykem do O a z druhé strany je hřídel uložena jednořadým kuličkovým ložiskem Obr. 92.



Obr. 92 Schématický návrh nového experimentálního zařízení

---

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá studiem rotačního magnetoreologického těsnění. V práci jsou stanoveny provozní parametry MR těsnění (tlaková únosnost, velikost ztrátového momentu). MR těsnění se vyznačuje vysokou tlakovou únosností a velkým brzdícím momentem při rotaci hřídele. I přes značnou výhodu, které toto těsnění má oproti standardně používanému Ferrotěsnění (velké tlakové únosnosti) se vyskytuje pouze stopové množství publikací, které se zabývají MR těsněním. V práci byl dále navrhnout zcela nový magnetický obvod, který byl identifikován jako Magneto-Rheology-Gradient-Pinch-Seal (Magnetoreologické gradientní svěrné těsnění) dále jen MRGPS. Tato nová koncepce byla navržena speciálně pro využití MR kapaliny jako těsnicí médium v aktivní zóně a vyznačuje se vysokou tlakovou únosností a nízkým ztrátovým momentem při rotaci hřídele. Dále velmi efektivně řeší současně řešený problém a to prosakování nosného oleje z MR kapaliny.

V diplomové práci je shrnut současný stav poznání, který rozděluje a hodnotí předchozí studia dané problematiky a porovnává provozní parametry standardně používaného Ferrotěsnění s MR těsněním. Vzhledem k tomu, že odborných publikací zabývajících se MR těsněním je pouze stopové množství. Věnovala se rešeršní část převážně konstrukci Ferrotěsnění a jejím provozním parametrům. Dále je detailně popsána metodika měření ztrátového momentu a měření velikosti tlakové únosnosti, včetně aplikovaných prostředků (zařízení, software, metody a materiály). Uváděné výsledky sledovaných parametrů (tlaková únosnost a velikost ztrátového momentu), byli získány za pomoci zkonstruovaného experimentálního zařízení.

Vytyčený cíl práce byl splněn v plném rozsahu včetně potvrzení pracovní hypotézy a zodpovězení vědecké otázky. Výsledkem řešení diplomové je G funkční vzorek (134891) a patentová přihláška MRGPS.

V průběhu práce vyvstávají nové otázky a hypotézy, které nabádají k dalšímu studiu. Například by bylo vhodné zkonstruovat zařízení, které by dovolilo pozorovat chování MR kapaliny uvnitř aktivní zóny, kdy je těsnění vystaveno přetlaku a rotaci hřídele. Samostatný výzkum by jistě bylo potřeba pro vhodnou MR kapalinu, kde ideální MR kapalina je odolná proti průsaku nosného oleje, při aplikaci do aktivní zóny v ní nevznikají vzduchové bubliny. Popřípadě prostudovat vliv drsnosti a vlnitosti povrchu hřídele u MRGPS na tlakovou únosnost.

## 8 BIBLIOGRAFIE

- [1] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití. 2007, 78–79. Dostupné z: [www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=34814](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34814)
- [2] NAM, Tran Hai a Kyoung Kwan AHN. A new structure of a magnetorheological brake with the waveform boundary of a rotary disk. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, **18**(11), 115029. ISSN 0964-1726. Dostupné z: [doi:10.1088/0964-1726/18/11/115029](https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/11/115029)
- [3] CARLSON, J. David a Mark R. JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, **10**(4), 555–569. ISSN 09574158. Dostupné z: [doi:10.1016/S0957-4158\(99\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(99)00064-1)
- [4] GONCALVES, F D a J D CARLSON. An alternate operation mode for MR fluids—magnetic gradient pinch. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, **149**, 12050. ISSN 1742-6596. Dostupné z: [doi:10.1088/1742-6596/149/1/012050](https://doi.org/10.1088/1742-6596/149/1/012050)
- [5] POYNOR J.C. An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun. Shock and Vibration [online]. IOS Press, 2001, 8(F0020003), 147-155 [cit. 2016-07-16]. ISSN 1070-9622
- [6] MOON, Seok-Jun, Young-Chul HUH, Hyung-Jo JUNG, Dong-Doo JANG a Heon-Jae LEE. Sub-optimal design procedure of valve-mode magnetorheological fluid dampers for structural control. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. 2011, **15**(5), 867–873 [vid. 2017-04-21]. ISSN 1226-7988. Dostupné z: [doi:10.1007/s12205-011-1178-9](https://doi.org/10.1007/s12205-011-1178-9)
- [7] KALUVAN, Suresh a Seung-Bok CHOI. Design of current sensor using a magnetorheological fluid in shear mode. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, **23**, 127003. ISSN 0964-1726. Dostupné z: [doi:10.1088/0964-1726/23/12/127003](https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/12/127003)
- [8] SAPIŃSKI, Bogdan, Wojciech HORAK a Andrzej SIOMA. Experiments of MR fluid behaviour in the squeeze mode using the vision method. *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference, ICCCC 2014* [online]. 2014, **c**, 513–516. Dostupné z: [doi:10.1109/CarpathianCC.2014.6843658](https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2014.6843658)
- [9] JIAOTONG, PEKINGSKÁ UNIVERSITA. A magneto-rheological fluid for sealing. CN 103789068 A. 2014.
- [10] YANG, Xiaolong, Zhili ZHANG a Decai LI. Numerical and experimental study of magnetic fluid seal with large sealing gap and multiple magnetic sources. *Science China Technological Sciences* [online]. 2013, **56**(11), 2865–2869. ISSN 16747321. Dostupné z: [doi:10.1007/s11431-013-5365-4](https://doi.org/10.1007/s11431-013-5365-4)
- [11] JIBIN, Zou a Lu YONGPING. Numerical Calculations for Ferrofluid Seals. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 1992, **28**(6), 3367–3371. ISSN 19410069. Dostupné z: [doi:10.1109/20.179812](https://doi.org/10.1109/20.179812)
- [12] YU, Z Y a W ZHANG. Application study of magnetic fluid seal in hydraulic turbine [online]. 2012, **72020**(287), 2–6. ISSN 1755-1307. Dostupné z: [doi:10.1088/1755-1315/15/7/072020](https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/7/072020)
- [13] RADIONOV, A. V. Application of Magnetic Fluid Seals for Improving Reliability of Air Coolers. *Chemical and Petroleum Engineering* [online]. 2015, **51**(7–8), 481–486. ISSN 0009-2355. Dostupné z: [doi:10.1007/s10556-](https://doi.org/10.1007/s10556-)

- 015-0073-5
- [14] RADIONOV, A., A. PODOLTSEV a A. ZAHORULKO. Finite-element analysis of magnetic field and the flow of magnetic fluid in the core of magnetic-fluid seal for rotational shaft. *Procedia Engineering* [online]. 2012, **39**, 327–338. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2012.07.038
  - [15] MITAMURA, Yoshinori, Tetsuya YANO, Wataru NAKAMURA a Eiji OKAMOTO. A magnetic fluid seal for rotary blood pumps: Behaviors of magnetic fluids in a magnetic fluid seal. *Biomed Mater Eng* [online]. 2013, **23**(1–2), 63–74. ISSN 09592989. Dostupné z: doi:10.3233/bme-120733
  - [16] KORDONSKI, W. I. a S. R. GORODKIN. Magnetorheological Fluid-Based Seal. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 1996, **7**(5), 569–572 [vid. 2017-04-21]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X9600700518
  - [17] POTO CZNY, Marcin a Bolesław ZACHARA. Influence of Magnetorheological Fluid Volume onto Obtained Critical Pressures on Rotary Shaft Seals. *Key Engineering Materials* [online]. 2011, **490**, 119–127 [vid. 2017-04-21]. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.490.119
  - [18] IYENGAR, Vardarajan R., Alexander a. ALEXANDRIDIS, Simon C. TUNG a David S. RULE. Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids©. *Tribology Transactions* [online]. 2004, **47**(1), 23–28. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/05698190490279083
  - [19] HA, Sung Hoon, Min-sang SEONG a Seung-bok CHOI. Design and vibration control of military vehicle suspension system using magnetorheological damper and disc spring [online]. nedatováno, **65006**. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/6/065006
  - [20] PAVLÍČEK, D. *Testování magnetického těsnění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kubík.

**9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN****9****9.1 Seznam použitých zkratek****9.1**

FF	Ferrokapalina
MFS	Magnetoreologické kapalinové těsnění
MKP	Metoda konečných prvků
MR	Magnetoreologické
MRGPS	Magnetoreologické gradientní svěrné těsnění
N	Severní pól
S	Jižní pól

**9.2 Seznam použitých symbolů a veličin****9.2**

$\mu_0$ [-]	Permeabilita vakua
$B$ [T]	Magnetická indukce
$D$ [m]	Průměr
$F$ [N]	Síla
$F_m$ [N/m <sup>3</sup> ]	Objemová síla
$F_{mag}$ [N]	Síla potřebná pro pohyb desek od magnetické složky
$F_{MR}$ [N]	Výsledná síla potřebná pro pohyb desek
$F_\mu$ [N]	Odpor magnetoreologické kapaliny při rotaci
$g$ [m]	Velikost mezery těsnění
$H$ [A/m]	Intenzita magnetického pole
$h$ [mm]	Hloubka zubu
$I$ [A]	Proud
$L_g$ [mm]	Mezera těsnění
$L_m$ [mm]	Délka magnetu
$L_p$ [mm]	Délka bříty
$M_s$ [A/m]	Hodnota magnetické saturace kapaliny
$n$ [Hz]	Otáčky hřídele
$N_i$ [-]	Počet zubů těsnění
$p$ [Pa]	Tlaková únosnost MR ventilu
$P$ [Pa]	Tlaková únosnost MR těsnění
$Q$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost průtoku mag. kapaliny
$r$ [m]	Rádus
$R_a$ [mm]	Rádus hřídele
$R_{mi}$ [mm]	Vnitřní rádus magnetů
$R_{mo}$ [mm]	Vnější rádus magnetů
$R_{pi}$ [mm]	Vnitřní rádus bříty
$R_{po}$ [mm]	Vnější rádus bříty
$s$ [mm]	Šířka drážky

$t$ [mm]	Šířka zubu
$v_0$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Obvodová rychlost
$v_c$ [m]	Vzdálenost magnetických částic
$\gamma$ [m]	přetvoření MR kapaliny
$\theta$ [°]	Úhel vybrání břitu
$\mu$ [Pa.s]	dynamická viskozita
$\mu_r$ [-]	Permeabilita ferrokapaliny
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota magnetické kapaliny
$\tau_y$ [Pa]	smykové napětí MR kapaliny
$\omega$ [rad/s]	Úhlová rychlost

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 1</b> Princip magnetického těsnění.....	13
<b>Obr. 3</b> Zatěžovací módy MR kapaliny[3].....	14
<b>Obr. 2</b> MR efekt [2]. .....	14
<b>Obr. 4</b> Alternativní zatěžovací módy MR kapaliny (upraveno) [4].....	15
<b>Obr. 5</b> Ukázka ventilového módu [6] .....	15
<b>Obr. 6</b> MR brzda a) jednolamelová, b) vícelamelová [2] .....	16
<b>Obr. 7</b> Ukázka tahového-tlakového módu a) bez zatížení, b) se zatížením[8] .....	16
<b>Obr. 8</b> Svěrací mód (upraveno)[4].....	17
<b>Obr. 9</b> Ucpávkový mód (upraveno) [4] .....	18
<b>Obr. 10</b> Tlaková únosnost ventilu MGP [4] .....	18
<b>Obr. 11</b> Schéma magnetického těsnění 1) hřídel, 2) vnější trubka, 3) zdroj mag. pole, 4) břitý těsnění, 5) mag. kapalina (upraveno) [11].....	19
<b>Obr. 12</b> Závislost množství mag. kapaliny na tlakovou únosnost [11] .....	21
<b>Obr. 13</b> Závislost počtu břitů na tlakovou únosnost těsnění [11] .....	21
<b>Obr. 14</b> Uspořádání více břitů a více zdrojů mag. pole [10] .....	22
<b>Obr. 15</b> Hranice výskytu magnetické kapaliny [11] .....	22
<b>Obr. 16</b> MKP výpočet objemových sil v magnetické kapalině [14].....	23
<b>Obr. 17</b> Rozložení magnetické indukce v mezeře mag. těsnění [14] .....	23
<b>Obr. 18</b> Rozložení rychlosti proudění v tečném směru rotace hřídele [14].....	24
<b>Obr. 19</b> Rozložení rychlosti proudění v rovině řezu [14] .....	24
<b>Obr. 20</b> Tvar břitu těsnění pro velkou mezeru [10] .....	25
<b>Obr. 22</b> Závislost tvaru zubů na tlakovou únosnost těsnění [11] .....	26
<b>Obr. 21</b> Schéma standu pro test magnetického těsnění [11].....	26
<b>Obr. 23</b> Ukázka MKP výpočtu těsnění turbíny [12].....	27
<b>Obr. 24</b> Experimentální stand 1) tlaková nádoba, 2) tlakoměr, 3) stojan, 4) těsnění, 5) motor, 6) ventil [10] .....	27
<b>Obr. 25</b> Magnetické těsnění s krytem [15] .....	28
<b>Obr. 26</b> Testovací zařízení (upraveno), (1) rotační viskozimetr, (2) hřídel, (3) MR kapalina, (4) Magnetický obvod, (5) tlakoměr, (6) hadice, (7) kohout, (8) ložisko, (9) cívka, (10) přetlaková komora [16] .....	29
<b>Obr. 27</b> Porovnání tlakové únosnosti těsnění s MR kapalinou a Ferrokapalinou [16] .....	30
<b>Obr. 28</b> Tlaková únosnost magnetického těsnění v závislosti na velikosti otáček [16] .....	30
<b>Obr. 29</b> Vliv geometrie břitu na přetlak těsnění [16].....	31
<b>Obr. 30</b> Velikost ztrátového kroutícího momentu [16] .....	31
<b>Obr. 31</b> Schéma experimentálního zařízení.....	34
<b>Obr. 32</b> Schéma zapojení zařízení .....	35
<b>Obr. 33</b> Ukázka z měření těsnění.....	35
<b>Obr. 34</b> Schéma testovacího standu.....	36
<b>Obr. 36</b> Ukázka uložení hřídele .....	37
<b>Obr. 35</b> Sestava tubusů [20].....	37
<b>Obr. 37</b> Ocelový tubus.....	38
<b>Obr. 38</b> MR těsnění varianta 1 .....	39
<b>Obr. 39</b> Princip funkce MR těsnění varianty1 .....	40



<b>Obr. 40</b> Ventilový mód (vlevo), Smykový mód (uprostřed), Tahový-tlakový mód (vpravo) MR těsnění .....	40
<b>Obr. 41</b> MR těsnění varianta 2 .....	41
<b>Obr. 42</b> Ukázka upínacího nákrůžku .....	41
<b>Obr. 43</b> Ukázka MR těsnění varianta 2 .....	41
<b>Obr. 44</b> Princip funkce MR těsnění varianty 3 .....	42
<b>Obr. 45</b> Rozložení magnetické indukce v MR těsnění varianta 3 .....	43
<b>Obr. 46</b> Testované parametry MR těsnění .....	43
<b>Obr. 47</b> Vliv mezery těsnění .....	44
<b>Obr. 48</b> Vliv tloušťky břitu .....	44
<b>Obr. 49</b> Vliv stabilizační fazetky .....	44
<b>Obr. 50</b> Vliv úhlu $\beta$ .....	44
<b>Obr. 51</b> Vliv úhlu $\alpha$ .....	44
<b>Obr. 52</b> Vliv parametru $a$ .....	44
<b>Obr. 53</b> Vliv parametru $c$ .....	45
<b>Obr. 54</b> Průběh velikosti magnetické indukce pro parametr $a$ .....	45
<b>Obr. 55</b> Navržené magnetické těsnění .....	46
<b>Obr. 56</b> Ukázka nově navrženého (MRGPS) těsnění .....	46
<b>Obr. 57</b> Schéma měření magnetické indukce u těsnění se zvětšenou mezerou .....	47
<b>Obr. 58</b> Ukázka z měření magnetické indukce .....	47
<b>Obr. 59</b> Ukázka z testování ztrátového momentu .....	48
<b>Obr. 60</b> Ukázka naměřených dat ztrátového momentu .....	49
<b>Obr. 61</b> Vyhlazená data ztrátového momentu .....	49
<b>Obr. 62</b> Schéma zapojení měřícího řetězce při měření ztrátového momentu .....	50
<b>Obr. 63</b> Ukázka připojení tenzometrického siloměru .....	51
<b>Obr. 64</b> Uchycení siloměru na lící straně příruby .....	51
<b>Obr. 65</b> Schéma zapojení měřícího řetězce při měření tlakové únosnosti .....	53
<b>Obr. 66</b> Ukázka meshe MKP analýzy .....	54
<b>Obr. 67</b> Ukázka výpočtu z MKP magneto-statické analýzy .....	54
<b>Obr. 68</b> Porovnání velikosti indukce ve zvětšené mezeře mezi MKP analýzou a naměřenými daty .....	55
<b>Obr. 69</b> B-H křivka oceli S235 .....	55
<b>Obr. 70</b> Ukázka z MKP výpočtu rozložení magnetické indukce magnetického těsnění .....	56
<b>Obr. 71</b> Průběh maximální velikosti magnetické indukce var. 1 ve štěrbině těsnění při velikosti štěrbin $0,12\text{mm}$ , počtem závitů na cívce 357 a MR kapalinou LORD 132-DG .....	56
<b>Obr. 72</b> Průběh maximální velikosti magnetické indukce ve štěrbině těsnění při velikosti štěrbin $0,4\text{ mm}$ , počtem závitů na cívce 100 a MR kapalinou LORD 132-DG .....	57
<b>Obr. 73</b> Ztrátový moment v závislosti na protékajícím proudu pro velikost štěrbin $g = 0,12\text{ mm}$ .....	57
<b>Obr. 74</b> Ztrátový moment v závislosti na protékajícím proudu pro velikost štěrbin $g = 0,4\text{ mm}$ .....	58
<b>Obr. 75</b> Ztrátový moment v závislosti na otáčkách hřídele pro velikost štěrbin $g = 0,12\text{ mm}$ .....	59
<b>Obr. 76</b> Ztrátový moment v závislosti na otáčkách hřídele pro velikost štěrbin $g = 0,4\text{ mm}$ .....	59



<b>Obr. 77</b> Porovnání ztrátového momentu varianty 2 a optimalizované varianty 3 v závislosti na velikosti proudu pro velikost otáček 10, 20 Hz a počtu závitů na cívce 100 .....	60
<b>Obr. 78</b> Porovnání ztrátového momentu varianty 2 a optimalizované varianty 3 v závislosti na velikosti otáček, při proudu procházejícím cívkou 1A .....	61
<b>Obr. 79</b> Ztrátový moment těsnění varianty 3 při různé velikosti vystaveného přetlaku .....	62
<b>Obr. 80</b> Popis parametrů MR těsnění pro výpočet tlakové únosnosti .....	63
<b>Obr. 81</b> Statická únosnost těsnění var. 2 při velikosti štěrbin 0,4 mm a počtu závitů na cívce 100 .....	64
<b>Obr. 82</b> Vznik bublin v MR kapalině .....	64
<b>Obr. 83</b> Průsak nosného oleje při přetlaku těsnění .....	65
<b>Obr. 84</b> Přetvoření magnetických částic při přetlaku v aktivní zóně .....	65
<b>Obr. 85</b> Porovnání statické tlakové únosnosti var.2 a var.3 .....	66
<b>Obr. 86</b> Dynamická tlaková únosnost varianty 3 .....	67
<b>Obr. 87</b> Nemagnetická hřídel po testech s MR kapalinou .....	68
<b>Obr. 88</b> Porovnání statické tlakové únosnosti magnetických těsnění .....	69
<b>Obr. 89</b> Porovnání ztrátového momentu magnetických těsnění .....	70
<b>Obr. 90</b> Porovnání vlastností magnetických těsnění .....	70
<b>Obr. 88</b> Schéma magnetického obvodu se spirálovými zuby .....	72
<b>Obr. 89</b> Schématický návrh nového experimentálního zařízení .....	73

---

## 11 SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1</b> Rozměry bříty [10].....	25
<b>Tab. 2</b> Parametry zubu [11].....	26
<b>Tab. 3</b> Výsledky práce návrhu magnetické jednotky [12] .....	27
<b>Tab. 4</b> Vypočtené hodnoty parametrů pro MR těsnění varianta 3 .....	45
<b>Tab. 5</b> Nastavení tenzometrického snímače .....	52
<b>Tab. 6</b> Nastavení tlakoměru .....	52
<b>Tab. 7</b> Porovnání výhod a nevýhod nového MRGPS se standardním MR těsněním	71

**12 SEZNAM PŘÍLOH****12****Příloha 1:**

APDL program

**Příloha 2:**

2D-Geometrie pro magneto-statickou analýzu

**příloha 3:**

Výkresová dokumentace :

*MRGPS*

Název	Č.v.
DISTANČNÍ KROUŽEK	3-MGPS-01/03
HŘÍDEL	3-MGPS-02/01
LEVÝ BŘIT	4-MGPS-01/03
MGP TĚSNĚNÍ	2-MGPS-01/11
MGP TĚSNĚNÍ	4-MGPS-11/11
MGP TĚSNĚNÍ	N2-MGPS-00/00
PRAVÝ BŘIT	4-MGPS-01/02
ROZPĚRNÝ KROUŽEK	4-MGPS-01/04

*MR TĚSNĚNÍ (var. 2)*

Název	Č.v.
DISTANČNÍ KROUŽEK	4-2016-01/01
HŘÍDEL	3-2016-02/01
LEVÝ BŘIT	4-2016-01/03
PRAVÝ BŘIT	4-2016-01/02
ROZPĚRNÝ KROUŽEK	4-2016-01/04
TĚSNĚNÍ	2-2016-01/1
TĚSNĚNÍ	4-2017-01/1

**PŘÍLOHA 1:**

FINISH

/CLEAR, ALL

jm=0.00008 !velikost prvku pod břity

jo=0.0005!velikost prvku u ocelových dílů o cívky

js=0.0011 !velikost prvku u okolního vzduchu

jh=0.0009 !velikost prvku u hliníku

HPR=740741!proudová hustota

!PROUD PROCHÁZEJÍCÍ CÍVKOU

PROUD HUSTOTA

!0,1	148148
!0,2	296296
!0,3	444444
!0,4	592593
!0,5	740741
!0,6	888889
!0,7	1037037
!0,8	1185185
!0,9	1333333
!1	1481481
!1,1	1629630
!1,2	1777778
!1,3	1925926
!1,4	2074074
!1,5	2222222
!1,6	2370370
!1,7	2518519
!1,8	2666667
!1,9	2814815
!2	2962963

/AUX15

!\*  
IOPTN,IGES,SMOOTH

IOPTN,MERGE,YES

IOPTN,SOLID,NO

IOPTN,SMALL,YES

IOPTN,GTOLER, DEFA

IGESIN,'typ01rev','igs','C:\Users\PC\Desktop\BRITY\'

LPLOT

!\*  
!\* NASTAVENÍ ELMAG ANALÝZY

/NOPR

KEYW,PR\_SET,1

```
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,1
KEYW,MAGNOD,1
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Magnetic-Nodal
```

! \*Nastavení materiálu \*

```
FINISH
/PREP7
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,1,,1
! hliník
```

!Nelinerání ocel

```
TB,BH,2,1,29,
TBPT,,150 , 0.1155
TBPT,,240 , 0.21
TBPT,,315 , 0.3444
TBPT,,385 , 0.44205
TBPT,,420 , 0.52815
TBPT,,490 , 0.651
TBPT,,560 , 0.76125
TBPT,,630 , 0.83475
TBPT,,665 , 0.8967
TBPT,,700 , 0.945
TBPT,,803 , 1.0311
TBPT,,946 , 1.113
TBPT,,1153 , 1.218
TBPT,,1296 , 1.281
TBPT,,1678 , 1.386
TBPT,,1996 , 1.449
TBPT,,2490 , 1.5225
TBPT,,3118 , 1.5855
TBPT,,3737 , 1.638
TBPT,,4558 , 1.6905
TBPT,,5362 , 1.7325
TBPT,,6165 , 1.7745
```

TBPT,,7438 , 1.8375  
TBPT,,8751 , 1.8795  
TBPT,,9854 , 1.911  
TBPT,,11058 , 1.9425  
TBPT,,12570 , 1.974  
TBPT,,14240 , 2.0055  
TBPT,,15672 , 2.0265

!konec nelinerání ocel

MPDATA,MURX,3,,1 ! měd

MP,RSVX,3,3.04878E-8 ! rezistivita mědi

TB,BH,4,1,17,  
TBPT,,0,0 ! A/m , T  
TBPT,,25000,0.2  
TBPT,,50000,0.35  
TBPT,,75000,0.46  
TBPT,,100000,0.56  
TBPT,,125000,0.65  
TBPT,,150000,0.72  
TBPT,,175000,0.77  
TBPT,,200000,0.84  
TBPT,,225000,0.88  
TBPT,,250000,0.94  
TBPT,,275000,0.97  
TBPT,,300000,1.03  
TBPT,,375000,1.13  
TBPT,,500000,1.3  
TBPT,,600000,1.45  
TBPT,,700000,1.55

! MR KAP

MPDATA,MURX,5,,1 ! vzduch

!VOLBA PRVKU

ET,1,PLANE53

!\*

KEYOPT,1,1,0

KEYOPT,1,2,0

KEYOPT,1,3,1

KEYOPT,1,4,0

KEYOPT,1,5,0

KEYOPT,1,7,0

!SÍŤ

TYPE, 1

MAT, 1

REAL,

```
ESYS,    0
SECNUM,
!*
FLST,5,5,5,ORDE,5
FITEM,5,30
FITEM,5,32
FITEM,5,35
FITEM,5,41
FITEM,5,45
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,    1,, 1,    0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,10,5,ORDE,10
FITEM,5,26
FITEM,5,-27
FITEM,5,29
FITEM,5,31
FITEM,5,34
FITEM,5,37
FITEM,5,-38
FITEM,5,40
FITEM,5,44
FITEM,5,46
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,    2,, 1,    0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,5,5,ORDE,5
FITEM,5,39
FITEM,5,42
FITEM,5,-43
FITEM,5,47
FITEM,5,-48
```

```
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3,, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,3,5,ORDE,3
FITEM,5,28
FITEM,5,33
FITEM,5,36
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 4,, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 25
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 5,, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,2,18,5,ORDE,7
FITEM,2,27
FITEM,2,-31
FITEM,2,34
FITEM,2,-36
FITEM,2,38
FITEM,2,40
FITEM,2,-48
AESIZE,P51X,jm,
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,26
```



```
FITEM,2,37
FITEM,2,39
AESIZE,P51X,jo,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,32
AESIZE,P51X,jh,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,33
AESIZE,P51X,jm,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,25
AESIZE,P51X,js,
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
!*
FLST,5,18,5,ORDE,7
FITEM,5,27
FITEM,5,-31
FITEM,5,34
FITEM,5,-36
FITEM,5,38
FITEM,5,40
FITEM,5,-48
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,,,33
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FLST,5,3,5,ORDE,3
```

```
FITEM,5,26
FITEM,5,37
FITEM,5,39
CM,_Y,AREA
ASEL,, ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,25
FITEM,5,32
CM,_Y,AREA
ASEL,, ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

FLST,2,6,4,ORDE,6
FITEM,2,16
FITEM,2,18
FITEM,2,20
FITEM,2,22
FITEM,2,34
FITEM,2,36
DL,P51X, ,AZ, ,
FLST,2,5,5,ORDE,5
FITEM,2,39
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,47
FITEM,2,-48
!*
BFA,P51X,JS, , ,HPR,0
```

FINISH

/SOL

MAGSOLV,0,-1,0.001, ,50,

!VYKRESLENÍ CESTY

/POST1

PLF2D,27,0,10,1

PATH,rez,1,60,60, ! Definování názvu cesty a počtu bodů na cestě

PPATH,1,0,0.00916,0.020,,0, ! Počáteční a koncové body cesty

PPATH,2,0,0.00916,-0.020,,0,

PDEF, ,H,SUM,AVG

PLPATH,HSUM! Vykreslení